

- ❑ Geliştirilmiş Kızıl Tilki Optimizasyon Algoritması ile Da-Da Alçaltıcı Tip Dönüştürücü PI Katsayılarının Optimizasyonu
- ❑ Fracture Morphology of Single-Lap Dissimilar Joints Between Thermoplastic Composite and AA5754-H111 with Laser Ablation Surface Pre-Treatment
- ❑ "Metallerin ve Plastiklerin Yüzey İşlemi (STM)" Sektöründe Faaliyet Gösteren Tesislerin EKÖK Uyum Durumunun İl Bazında Değerlendirilmesi
- ❑ Bor Karbür (B₄C) Katkılı Epoksi Esaslı Nanokompozitlerin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Seçimi
- ❑ Effect of Section Geometry and Material Type on Energy Absorption Capabilities of Crash Boxes
- ❑ Effect of Fiber Orientation on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)/PVC Sandwich Composites
- ❑ Çam Balı Takviyeli Kitosan Esaslı Aktif Filmler
- ❑ Investigation of Strontium (II) Ions Adsorption onto Long Chain Quaternary Amine Cationic-Volcanite: Modeling and Optimization by RSM
- ❑ Bazı Gıda Örneklerinde Gama Spektrometresi İle Doğal ⁴⁰K Aktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesi
- ❑ Linyit ve Taşkömürü Tozlarının Yanabilirlik ve Patlayabilirlik Açısından Değerlendirilmesi
- ❑ Road Density Calculations with Unidimensional LiDAR Sensor for Dynamic Intersection Management
- ❑ Radye Plak Rijitliğinin Düşey Eksenel Yüklü Kazık Grubu Davranışına Etkisi
- ❑ TCSC ve SSSC Cihazları Kullanılarak Enterkonnekte İletim Sisteminin Gerilim ve Yükleme Parametrelerinin Kontrolü: Örnek Güç Sistemi Uygulaması
- ❑ Bitüm Modifikasyonda Atık Halı, Stiren Etilen Bütadien Stiren ve Elvaloy RET Kullanılarak Fiziksel Özelliklerin Geliştirilmesi
- ❑ Konya Apa Barajı Havzasında Meteorolojik ve Hidrolojik Kuraklık Trend Analizi
- ❑ Gaziantep İlinde Bazı Hava Kirlenmelerinin Ölçümü, Modellenmesi ve Değerlendirilmesi
- ❑ Ultra Geniş Bant Teknolojisi ile Kapalı Alanlarda Konum Belirleme
- ❑ Paroksizmal Atriyal Fibrilasyonun 30 Dakikalık Kalp Hızı Değişkenliği Analizi Kullanılarak Teşhisinde Kalp Hızı ve Öznitelik Normalizasyon Yöntemlerinin Etkisi
- ❑ Development of a New Operation Strategy Enabling Transactions of Flexibility Among Households for a Residential Neighborhood
- ❑ Antikanser Etkili Doğal Bir Bileşik: Bakteriyel Ekzopolisakaritler




Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi

 Dergi web sayfası: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen>

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Yayın Organı

Official Journal of Zonguldak Bülent Ecevit University


Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Adına Sahibi <i>Owner on behalf of Zonguldak Bülent Ecevit University</i>	İsmail Hakkı ÖZÖLÇER Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Rektörü
Baş Editör/Editor in Chief	Yılmaz YILDIRIM Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Sorumlu Müdür/Publishing Manager	Yasin HAZER Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi
Yönetim Yeri/Head Office	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dekanlığı, 67100, İncivez, Zonguldak
Redaksiyon ve Teknik Destek/ <i>Redaction and Technical Support</i>	Salih ERDEM Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Haşim DURU Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Havva KARAHAN Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi
Yazışma Adresi/Correspondence Address	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Farabi Kampüsü, İncivez, 67100, Zonguldak Tel : +90 0372 291 11 00
İnternet Adresi/Web Address	https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
Yayınevi/Publishing House	Buluş Tasarım ve Matbaacılık Hizmetleri, Bahriye Üçok Cad. 9/1 06500 Beşevler, Ankara, Tel: +90 312 222 44 06 Faks: +90 312 222 44 07 www.bulustasarim.com.tr
Yayın Türü/Publication Type	Yerel Süreli / <i>Periodical</i> Yılda iki sayı yayımlanır: Haziran, Aralık <i>Published two issues per year: June, December</i> ISSN: 2146-4987
E-posta /Email	karaelmasfm@beun.edu.tr

Bu dergideki yazıların dergi standartlarına uygunluğunun kontrolü, dizimi, derginin yayıma hazır hale getirilmesi BULUŞ Tasarım ve Matbaacılık Hizmetleri San.Tic. tarafından gerçekleştirilmiştir.

Review of the articles in the journal to make sure they conform to publishing standards, typesetting, getting the journal ready for publication and finally the publishing process has been the responsibility of Buluş Design and Printing Services Company.


Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi

 Dergi web sayfası: <https://dergipark.org.tr/pub/karaelmasfen>

Yılda iki sayı yayımlanır

Published two issues per year


Baş Editör <i>Editor in Chief</i>	Yılmaz YILDIRIM	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi <i>Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering</i>
Yardımcı Editörler <i>Associate Editors</i>	İbrahim ALISKAN Yasin HAZER Salih ERDEM	Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi <i>Yıldız Technical University, Faculty of Electrical and Electronics</i> Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi <i>Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Pharmacy</i> Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi <i>Zonguldak Bülent Ecevit University</i>
İngilizce Redaksiyon <i>English Redaction</i>	Özgür ZEYDAN Can Murat DİKMEN Nizamettin ÖZDOĞAN	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi <i>Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering</i> Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi <i>Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Science</i> Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi <i>Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering</i>
Sorumlu Müdür <i>Publishing Manager</i>	Yasin HAZER	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi <i>Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Pharmacy</i>
Uluslararası Yayın Kurulu <i>International Editorial Board</i>	Ahmet ÖZASLAN Akira HIRAO Baki HAZER Boris NATALIN Claude TOUZET David W. STANLEY Enver DURMUŞOĞLU Ferhan ATICI Figen KAYA Haluk GÜVEN İskender YILGÖR İsmail Hakkı ÖZÖLÇER Kemal BÜYÜKGÜZEL Mahmut ÖZER Martin BOHNER Mehmet KARATAŞ Mehmet YAMAN Melih GENİŞ Mustafa SÖZEN Münevver PINAR Neil CUMBERLIDGE Nursel GÜL Per Nicolai MARTENS Rafat SIDDIQUE Remzi KARAGÜZEL Suna CEBESOY Şahnaz BOLKENT Ten FEIZI Türkan KOPAÇ Umut TOPRAK Yılmaz YILDIRIM	Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye Tokyo Institute of Technology, Japan Kapadokya University, Nevşehir, Türkiye Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye University of Provence, Marseille Cedex, France Agricultural Research Service-USDA, United States Ege University, İzmir, Türkiye Western Kentucky University, United States Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye Koç University, Istanbul, Türkiye Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye Republic of Türkiye Ministry of National Education, Ankara, Türkiye Missouri University of Science and Technology, United States Necmettin Erbakan University, Konya, Türkiye Bolu İzzet Baysal University, Bolu, Türkiye Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye Ankara University, Ankara, Türkiye Northern Michigan University, Michigan, United States Ankara University, Ankara, Türkiye RWTH Aachen University, Aachen, Germany Civil Engineering Thapar University, Paitala (Punjab), India Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye Ankara University, Ankara, Türkiye Istanbul University, Istanbul, Türkiye Imperial College London, United Kingdom Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye Ankara University, Ankara, Türkiye Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye



AMAÇ ve KAPSAM

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi (<https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen>), Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nin resmi yayın organıdır.

Derginin amacı, Fen Bilimleri, Temel Sağlık Bilimleri ve Mühendislik Bilimleri alanlarında yapılan özgün araştırma makaleleri, derlemeler, kısa makaleler, teknik not, kitap eleştirileri ve bilimsel nitelikli editöre mektupları yayınlayan uluslar arası ve saygın bilimsel bir dergi olmaktır.

Bu dergide yayınlanan makaleler, bağımsız ve önyargısız çift-körleme hakemlik (peer-review) ilkeleri doğrultusunda bir danışma kurulu tarafından değerlendirilir. Makaleler başlıca altı kategoride yayımlanır: (1) "Araştırma Makaleleri", (2) "Derleme Makaleler", (3) "Kısa Makaleler", (4) "Teknik Not ve Vaka Takdimleri", (5) "Editöre Mektuplar", (6) "Kitap ve Yazılım Programı Eleştirileri". Makaleler Türkçe veya İngilizce dillerinde yazılabilir; İngilizce veya Türkçe Özetler ile anahtar sözcükler içermelidir.

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, Haziran ve Aralık aylarında olmak üzere yılda iki kez yayınlanmaktadır ve <https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen> internet adresi üzerinden takip edilebilir.

Yayın İzni

Bireysel kullanım dışında, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi'nde yayımlanan makaleler, şekiller ve çizelgeler yazılı izni olmaksızın çoğaltılamaz, bir sistemde arşivlenemez veya reklam ya da tanıtım amaçlı materyallerde kullanılamaz.

Bilimsel makalelerde, uygun şekilde kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.

Abone İşlemleri

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, Üniversite Kütüphanelerine ve bilim insanlarına düzenli olarak ulaştırılmaktadır. Yayımlanan makalelerin tam metnine, çizelgelerine ve özetlerine çevrim-içi olarak <https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen> adresinden ücretsiz olarak erişilebilmektedir.

Yazıların Bilimsel ve Hukuki Sorumluluğu

Yayımlanan yazıların bilimsel ve hukuki sorumluluğu yazarlarına aittir. Yazıların içeriğinden ve kaynakların doğruluğundan yazarlar sorumludur. Editör, Yardımcı Editörler, Yayın ve Danışma Kurulu üyeleri ve Yayımcı, dergideki hatalardan veya bilgilerin kullanımından doğacak olan sonuçlardan dolayı sorumluluk kabul etmez.

Yazarlarımızın etik ihlalleri ile ilgili tüm iddia ve kesinleşmiş süreçler kendi sorumluluklarında olup, kesinleşen etik ihlalleri durumunda makale otomatik iptal edilir.

AIMS and SCOPE

Karaelmas Science and Engineering Journal (<https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen>), is the official journal of Zonguldak Bülent Ecevit University.

The journal's aim is to be scientific journal publishing original papers, reviews, short communications, technical notes and scientific editorial letters of science in the following areas: basic sciences, basic medicine science and engineering fields.

Articles submitted to this journal are evaluated in a double blinded peer-reviewed fashion by an advisory committee. Articles are published mainly in six categories: (1) "Research articles", (2) "Review Articles", (3) "Short Communications", (4) "Technical Notes and Case Reports", (5) "Letters to the Editor" and (6) "Book/Software Reviews". All articles may be written in Turkish or English, and should include English and Turkish abstracts and key words.

Karaelmas Science and Engineering Journal is published two issues per year in June and December.

The journal has also been available on-line by a website: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen>

Permission Requests

Manuscripts, figures and tables published in the Karaelmas Science and Engineering Journal cannot be reproduced, archived in a retrieval system, or used for advertising purposes, except personal use.

Quotations may be used in scientific articles with proper referral.

Subscriptions

Karaelmas Science and Engineering Journal is delivered complimentary to University Library and scientists Tables of contents, abstracts and full texts of all articles published are accessible free of charge through the web site <https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen>

Material Disclaimer

Scientific and legal responsibilities pertaining to the papers belong to the authors. Contents of the manuscripts and accuracy of references are also at the authors' responsibility. Editor, Associate Editors, Editorial and Advisory Board members and the Publisher decline responsibility for errors or any consequences arising from the use of information contained in this journal.

All claims and finalized processes regarding violations of ethics by our authors are under their own responsibility, and in case of ethical violations, the article is automatically canceled.



YAZARLARA BİLGİLER

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, Fen Bilimleri, Temel Sağlık Bilimleri ve Mühendislik Bilimleri alanlarında yapılan özgün araştırma makaleleri, derlemeler, kısa makaleler, teknik not, kitap eleştirileri ve bilimsel nitelikli editöre mektupları yayınlayan uluslararası bir dergidir. Aralık ve Haziran aylarında olmak üzere yılda iki kez yayınlanır. Dergi, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfeninternet> adresi üzerinden takip edilebilir.

Dergide yayınlanacak makale türleri aşağıdaki gibidir.

Araştırma makalesi: Makale mutlaka orijinal ve daha önce hiç bir dergide basılmamış veya sunulmamış olmalı, tablo ve şekiller dahil 20 sayfayı geçmemelidir.

Derlemeler: Herhangi bir araştırma alanındaki son yıllarda yaşanan gelişmeleri ve bu konuda son yıllarda yapılmış çalışmaların bir araya getirildiği makale türüdür. 15 sayfayı geçmemelidir.

Kısa makaleler: Küçük çapta yapılan çalışmalar, orijinal araştırma deneylerinin ön sonuçlarından, yeni buluşlar ve klinik deneylerden oluşmalı ve 5 sayfayı geçmemelidir.

Teknik notlar, Olgu sunumları: Bilimsel olarak önemli katkı sunan raporlardan oluşmalı ve 3 sayfayı geçmemelidir.

Editöre mektuplar: Herhangi bir araştırma konusuna ait fikirler, haberleri, önerileri kapsamaludur ve 2 sayfayı geçmemelidir.

Kitap veya yazılım programlarına ait eleştiriler: Kitap veya yazılım programı hakkındaki kısa ve özet bilgileri içermelidir ve 1 sayfayı geçmemelidir.

YAYIN KURALLARI

Dergide yayınlanacak makalelerin yazım dili Türkçe veya İngilizcedir. Yazım kurallarına uymayan makaleler, hakemlere gönderilmeden düzeltilmek üzere yazara geri gönderilir. Bu nedenle derginin yazım kuralları dikkate alınmalıdır. Makaleler şekiller ve çizelgeler dahil 20 sayfayı geçmemelidir. Dergiye yayın için gönderilen makaleler iki uzman hakem tarafından değerlendirilir ve yayınlanmasına editör tarafından karar verilir. Dergiye gönderilen yazılar başka bir yerde yayınlanmamış veya yayınlamak üzere gönderilmemiş olmalıdır. Dergide yayınlanmak üzere kabul edilmiş olan yazıların yayın hakları Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisine aittir. Düzeltilmiş yazılar 3 ay içerisinde editöre gönderilecektir.

DEĞERLENDİRME SÜRECİ

Dergi yönergelerine uymayan yazılar, bilimsel değerlendirme yapılmadan yazarlara iade edilecektir. Dergi yönergelerine uygun olarak gönderilen makaleler, onları hakemlere atayacak olan Baş Editör veya Yardımcı Editör tarafından incelenir. İnceleme süreci tek kördür. Hakem önerileri, alan editörlerinin görüşleri ve yayının literatüre katkısı doğrultusunda Editör karar mektubunu yazar. İncelenmemiş tüm yazılar 10 gün içinde geri gönderilir ve yazıların karar mektupları 3-6 ay içinde gönderilir.

Makalelerdeki tüm değişiklikler yazarları tarafından yapılır. Son şekli verilen ve yayına hazırlanan makaleler üzerinde yazarlarca bir değişiklik

yapılamaz. Her ne nedenle olursa olsun makalesinin yayınlanmasından vazgeçen bir yazar, makalesini dergiye sunum tarihinden itibaren en fazla iki ay içerisinde çekebilir. Hayvan deneylerinde etik kurul izin belgesi gereklidir.

MAKALE SUNUMU

Makaleler elektronik ortamda sunulacaktır.

YAZIM KURALLARI

- Makale A4 boyutlu kağıda, tek yüze, tüm kenarlardan 2.5 cm boşluk bırakılarak, çift satır aralıklı yazılmalıdır.
- Yazım biçimi, Times New Roman yazı tipi ve 12 punto büyüklüğünde Microsoft Word Processor kullanılarak hazırlanmalıdır. Tamamı siyah-beyaz renkte olmalıdır (şekil ve çizelgeler dahil).
- Satır başları numaralandırılmalıdır. Sayfa numaraları, sayfaların alt orta bölümlerine konmalıdır.
- Makalenin ana bölümleri, Türkçe Öz, İngilizce Öz (Abstract), Giriş, Gereç ve Yöntem/Yöntemler (Saha tanımlamaları, çalışılan malzeme v.d. Yöntemler kısmının altında alt başlık olarak verilmelidir), Sonuçlar, Tartışma/Sonuçlar ve Öneriler, Teşekkür ve Kaynaklardan oluşur. Öz hariç bütün bölümler numaralandırılmalıdır.
- Latince isimler italik olarak yazılmalıdır.

Kapak Sayfası: Yazının ayrı word dosyası olarak bir başlık sayfası olmalıdır; başlık; tüm yazarın tam adı, kurumlar ve ORCID'leri; sorumlu yazarın iletişim adresi ve e-posta adresi.

Kapak Yazısı Planı:

- Türkçe ve İngilizce başlık
- Yazar adları ve adresleri
- Sorumlu yazarın adı, adresi ve e-posta adresi
- Kısa başlık
- Tüm yazarların ORCID'leri

Başlık: Metne uygun kısa ve anlaşılır olmalıdır. Ortalanmış olarak, sadece ilk harfi büyük sonrakiler küçük, 14 punto ve koyu olmalıdır.

Yazar adları ve adresleri: Başlığın altındaki yazar isimleri kısaltmasız, adı ve soyadı (varsa ikinci ismi veya soy ismi) küçük harf ile ortalanmış olarak 12 punto ve koyu yazı karakteri ile yazılmalıdır. Yazar isimlerinden sonra adres belirtmek için üst simge olarak rakam kullanılmalıdır (^{1 2 3} gibi). Sorumlu yazar isminde yıldız sembolü olmalıdır (*). Yazarların tam adresleri küçük harfle, ortali ve 10 punto olarak yazılmalı, Üniversite, Fakülte, Bölüm ve Şehir belirtilmelidir. Sorumlu yazarın e-posta adresi, adresinin sonunda mutlaka verilmelidir.

Öz ve Anahtar Kelimeler: Özetler 10 punto ile yazılmalı ve 250 kelimeyi geçmemelidir.

Türkçe ve İngilizce özetin altında 2-6 kelimedenden oluşan Anahtar kelimeler yazılmalıdır.



Özet Sayfasının Planı

1. Türkçe makalelerde

- | | |
|---------------------|--------------------------------|
| a) Türkçe Başlık | f) Öz |
| b) İngilizce Başlık | g) Anahtar Kelimeler |
| c) Yazar Adları | h) İngilizce Abstract |
| d) ORCID | i) İngilizce Anahtar Kelimeler |
| e) Adres(ler) | (Keywords) |

2. İngilizce makalelerde

- | | |
|-------------------------|----------------------|
| a) İngilizce Başlık | f) Abstract |
| b) Türkçe Başlık | g) Keywords |
| c) Yazar Adları | h) Öz |
| d) ORCID | i) Anahtar Kelimeler |
| e) İngilizce Adres(ler) | |

Tam Metin: Makaledeki ana başlıklar ve varsa alt başlıklar anlaşılır olmalıdır. Ana metin başlıkları sola yanaşık, baş harfi büyük, 12 punto ve koyu renkli olmalıdır. Alt başlıklar 10 punto, küçük ve italik yazılmalıdır.

Giriş: Araştırmanın amacı, önemi ve konusunda yapılmış yayınlar arasındaki yeri belirtilmelidir.

Gereç ve Yöntem/Yöntemler: Uygulanan yöntemler ve teknikler anlaşılır bir şekilde verilmelidir.

Sonuçlar: Bu bölümde elde edilen bulgulara (sonuçlara) yer verilmeli, sonuçlar gerekirse şekil ve çizelgelerle de desteklenmelidir.

Tartışma: Elde edilen bulgular ilgili literatürlerle karşılaştırılmalıdır. Sonuçların benzer ve farklılıkları yorumlanarak, çalışmadan elde edilen bulgular özetlenmelidir.

Teşekkür: Araştırmaya destek olan kişi ve kuruluşlara yapılan teşekkürleri içermelidir.

Her türlü çıkar çatışması, finansal destek, yazarların katkı beyanı, bağış ve diğer editöryal (istatistik analiz, İngilizce/Türkçe değerlendirme) ve/veya teknik yardım var ise metnin sonunda sunulmalıdır.

Kaynaklar: Yayınlanmamış bilgiler kaynak olarak verilmemelidir. Ancak, tamamlanmış ve jüriden geçmiş tezler kaynak olarak verilebilir. Kaynaklar, makale sonunda alfabetik sırada (yazar soyadlarına göre) verilmeli, yazar adı ve soyadları, makalenin basım tarihi koyu olarak yazılmalıdır.

Kaynakların metin içerisindeki kullanımı aşağıda verilmiştir:

1. Türkçe Makalelerde:

Tek yazarlı çalışma (Reşat 2001, Landen 2002).

İki yazarlı çalışma (Aydan ve Geniş 2008, Stanley ve Tunaz 1999, Büyükgüzel ve Yazgan 2002) şeklinde belirtilmelidir. Üç ve daha fazla yazar söz konusu ise, (Kuşçu vd. 2002, Yılmaz vd. 2007) şeklinde, aynı yazarın birden fazla makalesi kullanılacaksa (Simith vd. 1995a, b, 1997) şeklinde olmalıdır. Herhangi bir kaynaktan alıntı yapılmışsa: Aydan ve Geniş (2008)'e göre.....şeklinde olmuştur; Yılmaz vd. (2007)'e göre; diye yazılmalıdır.

2. İngilizce Makalelerde:

Tek yazarlı çalışma (Landen 2002).

İki yazarlı çalışma (Anderson and Pratt 2002, Büyükgüzel and Yazgan 2002). Herhangi bir kaynaktan alıntı yapılmışsa Ünlü and Gerçek (2003)'e göre...şeklinde, diye belirtilmelidir.

Üç ve daha fazla yazardan oluşan çalışmalar (Evans et al. 2001, Landen et al. 2004) şeklinde olmalıdır. Alıntı yapılacaksa Landen et al. (2002)'ye göre; diye yazılmalıdır.

Kaynak gösterilecek yayında kaç isim varsa, kaynaklar bölümünde tümü belirtilmeli, kısaltma yapılmamalıdır.

Türkçe ve İngilizce makalelerde, yazılım programları metin içerisinde ismi ve yılı belirtilerek (PROC GLM, SAS Institute 1999) şeklinde verilmelidir.

Kaynakların metin sonunda verilmiş şekilleri aşağıdaki gibidir:

Makale:

Büyükgüzel, K., Yazgan, Ş. 1996. Bazı antibiyotiklerin endoparazitoid *Pimpla turionellae* L. (Hymenoptera: Ichneumonidae)'nın yaşama ve gelişimine etkileri. *Turk. J. Zool.*, 20:1-7.

Özer, M., Perc, M., Uzuntarla, M. 2009. Stochastic resonance on Newman-Watts networks of Hodgkin-Huxley neurons with local periodic driving. *Phys. Let. A*, 373 : 964-968.

Kitap:

Reşat, U. 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. 4. Basım, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Nitelik Matbaacılık, Ankara, 385 s.

Sanford, R.J. 2003. Principles of fracture mechanics, Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, USA, 404 pp.

Kitapta Bölüm:

Cheeseman, K.H. 1993. Lipid peroxidation in biological systems. In: B. Halliwell, O.I. Auroma [eds.], DNA and Free Radicals. Ellis Horwood, London, pp. 12-17.

Rapor:

Makarewicz, J.C., Lewis, T., Bertram, P. 1995. Epilimnetic phytoplankton and zooplankton biomass and species composition in Lake Michigan, 1983-1992. U.S. EPA Great Lakes National Program, Chicago, IL. EPA 905-R-95-009.

Kongre, Sempozyum:

Kuşçu, Ş., Azar A., Kısa, A. 1997. Arşiv bilgi ve belgelerinden yararlanılarak grafik kadastronun sayısallaştırılması ve bir uygulamanın sonuçları. 6. *Harita Kurultayı*, s. 211-222, Ankara.

Kaplan, A. 2000. Ankara havasında bulunan biyolojik partiküller. XV. Ulusal Biyoloji Kongresi, s. 45-50, Ankara.

İnternet:

Eğer bir bilgi herhangi bir internet sayfasından alınmış ise (internette alın ve dergilerde yayınlanan makaleler hariç), kaynaklar bölümüne internet sitesinin ismi ve konu başlığı tam olarak yazılmalıdır.

Anonim web sayfası:

Leafy seadragons and weedy seadragons. 2001. <http://www.windspeed.net.au/jenny/seadragons/>



Yazarlı web sayfası:

Dawson, J., Smith, L. Deubert, K. 31 Ekim 2002. <http://studytrekk.lis.curtin.edu.au/> şeklinde belirtilmelidir.

Baskıda olan makale:

Evans, MA. 2002. Makale başlığı. *Dergi*. (baskıda).

Tezler:

Özcan, A. 2006. Endüstriyel atıklar ve polipropilen lif içeren saha betonlarının özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 70 s.

Yazılım:

SAS Institute. 2001. PROC user's manual, version 6th ed. SAS Institute. Cary, NC.

Çizelgeler ve Şekiller: Tüm şekil ve çizelgeler makale içerisinde sırayla numaralandırılmalı (Çizelge 1., Şekil 1., Çizelge 2 ve 3, Şekil 2 ve 3; Şekil 4., Çizelge 2.), şekillerin sıra numaraları ve başlıkları altta, çizelgelerinki ise üstlerine yazılmalıdır. Grafik ve şekiller sayfa boyutları dikkate alınarak çizilmelidir. Çizelge ve şekillerin başlık ve açıklamaları, Kaynaklardan sonra ayrı sayfalar halinde Çizelgeler dizini ve Şekiller dizini olarak hazırlanmalıdır. Açıklamalardan sonra ayrı sayfalar halinde çizelge ve şekiller verilmelidir. Grafikler, çizimler ve fotoğraflar JPEG ya da TIFF formatında (en az 600 dpi çözünürlükte) siyah-beyaz veya renkli olarak sunulmalıdır. Fotoğraflarda büyütme göstermek için mutlaka bar kullanılmalıdır.

Çizelgede verilecek olan verilerde standart sapma veya standart hatalar (1.42 ± 1.36) şeklinde, istatistiksel analiz yapılmışsa (731.2ab) şeklinde, bunların başlık olarak yazılış şekilleri de (ort ± SE; ort ± SD, vb.) gibi olmalıdır.

Denklemler: Matematiksel ifadeler "Equation Editör" (word ortamında) kullanılarak 9 punto ve alt ve üst indisler 8 punto yazılmalıdır. Metin içerisinde geçen eşitlikler normal parantez () içerisinde numaralandırılmalıdır. Denklem sıra numarası ile birlikte (parantez içerisinde) yazılmalıdır.

Matematiksel denklemlerdeki eşitlikler:

$R = A_{\text{barrytype}} + B \log_{10}(f)$ (2) şeklinde olmalıdır.

Ekler: Tüm ekler ayrı sayfaya yazılmalı ve Romen rakamları ile numaralandırılmalıdır.

Matematik dalında yayın gönderecek yazarların konu sınıflandırma numarasını (AMS-Mathematical Subject Classification Number) belirtmeleri gerekir.

Semboller ve Birimler: Metrik sistem veya SI birimleri (kPa, kN/m³, g/cm², m/sn, g/m³, v.b.) kullanılmalıdır. Gerek metin içinde ve çizelgelerde, gerekse şekillerde rakamların ondalık bölümlerinin belirtilmesi için nokta kullanılmalıdır (10.25 gibi). Yüzdeler (%50) şeklinde belirtilmelidir.

Kısaltmalar: Zamanla ilgili olan kısaltmalar: sa (saat), dk (dakika), sn (saniye), y (yıl), hf (hafta) olarak belirtilmelidir. Tarihler verilirken gün ay ve yıl kısaltma yapmadan tam olarak yazılmalıdır (23 Ocak 2007).

Sayılar: Sayılar cümle başlarında yazı ile verilmelidir. Birden dokuza kadar olan sayılar yazı ile, 10 ve daha büyük sayılar rakamla

belirtilmelidir. Birden küçük olan sayılar (0.05, 0.56, 0.50, P < 0.05, v.b.) olarak belirtilmelidir. Binden büyük sayılarda yüzden sonra olan kısımlar virgülle ayrılmalıdır (100,000).

Dipnotlar: Çizelgede kullanılacak olan dipnotlar istatistiksel analiz yapıldığı durumlarda (*P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; NS, istatistiksel olarak önemsizdir, v.b.) şeklinde olmalıdır.

Derginin bir sayısında, ilk isim olarak bir yazarın üçten fazla eseri basılamaz. Dönemler içerisinde üçten fazla eser gönderilmişse, ilk üçü dışında kalanlar daha sonraki sayılara aktarılır.

Matematik ve ilgili konular için makalenin hazırlanması şu şekilde olmalıdır:

Makalenin ilk sayfasında, Matematik Reviews yıllık dizini itibaren en az bir 2010 MSC (Matematik Konu Sınıflandırması) numaralarını içermelidir. MSC Konu Sınıflandırması <http://www.ams.org/mathscinet/msc/msc2010.html> adresinden temin edilebilir.

Kaynaklar bölümünde, yazarların soy isimleri alfabetik sıraya göre dizilmeli ve numaralandırılmalıdır [1],[2],..gibi. Metin içerisinde kaynak numaraları köşeli parantez içerisinde alınmalıdır, [23] veya [12]-[15] gibi. Formül numaralarını ayırt etmek için, yuvarlak parantez içinde tırnak içerisine alınmalıdır. Yukarıdaki şartları sağlamayan yayınlar değerlendirmeye alınmaz.

Makale Yazım Kontrol Listesi

Makale dergiye sunulmadan önce makalenin yazım kurallarına uygun olup olmadığından emin olmak için aşağıda belirtilen kontrolleri yapınız.

- Başlık sayfası eklendi mi?
- İmla ve dilbilgisi kontrolü yapıldı mı?
- Tüm sayfa düzeni çift aralıklı yazıldı mı?
- Köşelerden 2.5 cm boşluk bırakıldı mı?
- Yazı tipi Times new roman ve büyüklüğü 12 punto mu?
- Metin içerisindeki başlıklar sola yanaşık, 12 punto ve koyu renkli yazıldı mı?
- Tüm yazarların adları ve soyadları kısaltma yapılmadan belirtildi mi?
- Adresler belirtildi mi?
- Başlık 14 punto koyu yazı karakteri ile ortalanarak yazıldı mı?
- Türkçe Öz ve Anahtar Kelimeler yazıldı mı?
- İngilizce Abstract ve Keywords verildi mi?
- Kaynaklar yazım kurallarına göre ve alfabetik sırayla yazıldı mı?
- Ondalık dilimler nokta ile belirtildi mi? (10.25 gibi)
- Yüzdeler gösterimler (%63, %10 gibi) şeklinde yapıldı mı?
- Çizelgelerin maksimum boyutu 16x20 cm; minimum 8 cm mi?
- Çizelgeler makale içerisinde sırayla verildi mi?
- Orijinal şekiller eklendi mi?
- Şekiller yazım kurallarına uygun olarak düzenlendi mi?
- Şekillerin maksimum boyutu 16x20 cm; minimum 8 cm mi?
- Şekiller makale içerisinde sırayla verildi mi?
- Çizelgeler ve Şekiller Dizini ayrı sayfalarda verildi mi?
- Tüm sayfa ve satırlara numara verildi mi?



ETİK KURALLAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesinin yayın organı olan Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi ulusal ve uluslararası tüm kurum ve kişilere ücretsiz olarak ulaşmayı hedefleyen hakemli bir dergidir.

Dergimize gönderilen bilimsel yazılarda, ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors) tavsiyeleri ile COPE (Committee on Publication Ethics)'un Editör ve Yazarlar için Uluslararası Standartları dikkate alınmaktadır.

Yazarlarımızın etik ihlalleri ile ilgili tüm iddia ve kesinleşmiş süreçler kendi sorumluluklarında olup, kesinleşen etik ihlalleri durumunda makale otomatik iptal edilir.

Hakemler İçin Etik Kurallar

Hakemler;

- Değerlendirdiği yazıların gizliliğine saygı gösterir ve makaleyi tartışmaz veya yazı hakkında başka herhangi bir kişiyle iletişim kurmaz.
- Olası bir çıkar çatışması olduğunda editörü konu hakkında bilgilendirir.
- Önerileri için nesnel ve yapıcı bir açıklama sağlar.
- Makaleye ilişkin kararlarının konudan veya yazarlık biçiminden etkilenmesine izin vermez.
- Güçlü bir bilimsel gerekçe olmadıkça yazarın kendi makalelerini belirtmesini istemez.
- Yazarlar tarafından yayınlanmadan önce kendi çalışmalarının hiçbirinde incelenen makalenin herhangi bir bölümünü veya bilgiyi çoğaltmaz.
- Hakem değerlendirmelerini sadece uzmanlıkları dahilinde ve makul bir süre içinde kabul eder.
- Yazının yayına çıkmasını geciktirecek ertelemeler yapmaz.
- Hakaret, düşmanca veya küçük düşürücü bir dil kullanmaz.
- Gönderilen makaleleri ve ilgili tüm materyalleri inceledikten sonra imha eder.

https://publicationethics.org/files/Ethical_guidelines_for_peer_reviewers_0.pdf

Yazarlar İçin Etik Kurallar

Yazarlar ve yardımcı yazarlar;

- International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) tarafından belirtilen yazar kriterlerine uygunluk sağlanır;
 - a. Eserin tasarımına veya tasarımına önemli katkılar sağlayan verilerin elde edilmesi, analizi veya yorumlanması
 - b. Çalışmanın hazırlanması veya literatürün içerik için eleştirel olarak gözden geçirilmesi
 - c. Yayınlanacak versiyonun nihai onayı

d. Çalışmanın herhangi bir bölümünün doğruluğu veya bütünlüğü ile ilgili soruların uygun şekilde soruşturulup çözülmesini sağlamada, çalışmanın tüm yönlerinden sorumlu olacak anlaşma.

- Gönderilen makaleler yazar(lar)ın özgün çalışması olmalıdır ve eşzamanlı olarak farklı yayıncılara gönderilmemelidir
- Yazar(lar) araştırma önerisinde, icrasında ya da araştırma sonuçlarını raporlarken araştırma suistimali olarak tanımlanan uydurma, tahrifat ya da intihalden sorumludur.
- Gönderilen makalelerde çıkar çatışması varsa editöre bilgi verilmelidir
- Gönderilen makalelerde ön kontrol, değerlendirme süreci ya da yayınlanmış olan sürümünde yazar veya yardımcı yazarlar tarafından hata fark edilirse bilgi vermek, düzeltmek ya da geri çekmek için editörü bilgilendirmelidir.
- Makale gönderildikten sonra yazar sıralamaları ve yazar eklemeli çıkartmaları önerilmemelidir
- Yazar(lar), etik kurul kararı gerektiren araştırmalar için etik kurul onayı aldığını; etik kurul adı, karar tarihi ve sayısı aday makalenin ilk-son sayfasında ve yöntem bölümünde belirtmeli, etik kurul kararını gösteren belgeyi makalenin başvurusuyla birlikte sisteme yüklemelidir.
- Yazarlar olgu sunumlarında olur/onam formunun alındığına ilişkin bilgiye makalede yer vermemelidir.
- Kullanılan fikir ve sanat eserleri için telif hakları düzenlemelerine riayet edilmesi gerekmektedir.
- Makale sonunda; Araştırmacıların Katkı Oranı beyanı, varsa Destek ve Teşekkür Beyanı, Çatışma Beyanı verilmelidir.

<http://www.icmje.org/icmje-recommendations.pdf>

https://www.ease.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/doi.10.20316.ESE_2018.44.e1.tr_.pdf

Editörler İçin Etik Kurallar

Editörler:

- Okuyucular, araştırmayı veya diğer bilimsel çalışmaları kimin finanse ettiği ve fon verenlerin araştırmada ve yayınlanmasında herhangi bir rolü olup olmadığı ve eğer öyleyse bunun ne olduğu konusunda bilgilendirilmelidir.
- Editörlerin yayın için bir makaleyi kabul etme veya reddetme kararları, makalenin önemi, özgünlüğü ve netliği ile çalışmanın geçerliliği ve derginin görev alanına uygunluğuna dayanmalıdır.
- Editörler, gönderimle ilgili ciddi sorunlar tespit edilmedikçe, gönderimleri kabul etme kararlarını tersine çevirmemelidir.
- Ciddi sorunlar tespit edilmedikçe yeni editörler, bir önceki editör tarafından yapılan başvuruları yayınlama kararlarını bozmamalıdır.



- Hakem değerlendirmesi süreçlerinin bir açıklaması yapılmalı ve editörler açıklanan süreçlerden önemli sapmaları ortaya çıkarmalıdır.
- Yazarların editöryal kararlara itiraz edebilmeleri için beyan edilmiş bir mekanizmaya sahiptir.
- Editörler, kendilerinden beklenen her şey hakkında yazarlara rehberlik etmelidir. Bu rehberlik düzenli olarak güncellenmeli ve bu koda atıfta bulunmalı veya bu koda bağlantı vermelidir.
- Editörler, International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) önerdiği yazarlık kriterlerini belirtmelidir.
- Editörler, kabul etmeden önce gözden geçirenlerin rekabet edebilecek potansiyel çıkarları ifşa etmelerini istemelidir bir sunumu gözden geçirin.
- Editörler, hakemlerin kimliklerinin korunmasını sağlayacak sistemlere sahip olmalıdır. Yazarlara ve hakemlere bildirilen açık bir inceleme sistemi kullanır.
- Editörler, yeni yayın kurulu üyelerine kendilerinden beklenen her şey hakkında kılavuzlar sunmalı ve mevcut üyeleri yeni politikalar ve gelişmeler hakkında güncel tutmalıdır.
- Editörler, derginin kalitesine ve uygunluğuna göre ve dergi sahibinin / yayıncının müdahalesi olmadan hangi makalelerin yayınlanacağına karar vermelidir.
- Editörlerin derginin sahibi ve / veya yayıncı ile ilişkilerini belirleyen yazılı bir sözleşmesi olmalıdır. Bu sözleşmenin şartları Dergi Editörleri için COPE Davranış Kuralları ile uyumlu olmalıdır.
- Editörler dergilerindeki hakem değerlendirmelerinin adil, tarafsız ve zamanında yapılmasını sağlamak için çaba göstermelidir.
- Editörler, dergilerine gönderilen materyallerin incelenirken gizli kalmasını sağlayacak sistemlere sahip olmalıdır.
- Editörler, dergilerdeki bölümlerin farklı amaç ve standartlara sahip olacağını kabul ederek, yayınladıkları materyalin kalitesini sağlamak için tüm makul adımları atmalıdır.

<https://publicationethics.org/files/Code%20of%20Conduct.pdf>



YAYIN ETİĞİ

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisinin yayın etiği beyanı, www.publicationethics.org adresinde bulunan Yayın Etiği Komitesi'nin (COPE) Davranış Kuralları kılavuzuna dayanmaktadır.

Editörlerin Görevleri

Adil ve editöryal bağımsızlık

Editörler sunulan makaleleri, yazarların ırkı, cinsiyeti, cinsel tercihi, etnik kökeni, vatandaşlığı, dini inancı, siyasi felsefesi veya kurumsal eğilimleri ne olursa olsun, sadece akademik yararları (önemi, özgünlük, çalışmanın geçerliliği, netliği) ve derginin kapsamıyla olan ilgisine göre değerlendirirler. Düzenleme ve yayınlama kararları, hükümetlerin veya derginin dışındaki diğer kurumların politikaları tarafından belirlenmez. Genel Yayın Yönetmeni, derginin tüm editöryal içeriği ve bu içeriğin yayınlama zamanlaması üzerinde tam yetkiye sahiptir.

Gizlilik

Editörler, gönderilen bir makaleyle ilgili hiçbir bilgiyi ilgili yazar, gözden geçirenler, potansiyel gözden geçirenler, diğer yayın danışmanları ve yayıncı dışında kimseye açıklamaz.

Açıklama ve çıkar çatışmaları

Editörler ve yayın kurulu üyeleri, gönderilen bir makalede açıklanan yayınlanmamış bilgileri, yazarların açık yazılı izni olmadan kendi araştırma amaçları doğrultusunda kullanmayacaktır. Yazının işlenmesi sonucunda editörler tarafından elde edilen ayrıcalıklı bilgi veya fikirler gizli tutulacak ve kişisel avantajları için kullanılmayacaktır. Editörler, makalelere bağlı herhangi bir yazar, şirket veya kurumla rekabet, işbirlikçi veya diğer ilişkilerden/bağlantılardan kaynaklanan çıkar çatışmaları olan yazılarını dikkate almaktan geri çekilecekler; bunun yerine, yayın kurulunun başka bir üyesinden yazıyı işlemesini isteyecekler.

Yayın kararları

Editörler, yayınlamak üzere değerlendirilen tüm makalelerin, alanında uzman en az iki gözden geçiren tarafından hakem incelemesinden geçmesini sağlar. Sorumlu müdür, söz konusu çalışmanın doğrulanmasına, araştırmacılar ve okuyucular için önemine, eleştirmenlerin yorumlarına ve iftira, telif hakkı ihlali ve intihal ile ilgili şu anda yürürlükte olan yasal gerekliliklere dayanarak, dergiye gönderilen yazılardan hangisinin yayınlanacağına karar vermekten sorumludur. Sorumlu müdür bu kararı verirken diğer editörler veya yorumcularla görüşebilir.

Soruşturmalara katılım ve işbirliği

Editörler (yayıncı ve/veya kurulla birlikte) gönderilen bir makale veya yayınlanmış makaleyle ilgili etik kaygılar ortaya çıktığında duyarlı önlemler alacaktır. Etik olmayan yayıncılık davranışlarının rapor edildiği her eylem, yayımlandıktan yıllar sonra keşfedilmiş olsa bile inceleneyecektir. Editörler, suistimal şüphesiyle uğraşırken COPE Akış Şemalarını takip eder. Eğer soruşturma üzerine, etik kaygı iyi kurulmuşsa, bir düzeltme, geri çekme, endişenin ifade edilmesi veya ilgili olabilecek diğer notlar dergide yayınlanacaktır.

Gözden Geçirenlerin Görevleri

Editöryal kararlara katkı

Akran incelemesi editörlerin editöryal kararlar almalarına yardımcı olur ve yazarlarla editöryal iletişim yoluyla yazarların makalelerini geliştirmelerine yardımcı olabilir. Akran incelemesi resmi bilimsel iletişimin önemli bir bileşenidir ve bilimsel çabanın merkezinde yer alır.

İstem

Bir makalede bildirilen araştırmayı gözden geçirmek için niteliksiz hisseden veya derhal gözden geçirilmesinin imkansız olacağını bilen davet edilen her hakem, editörleri derhal bilgilendirmeli ve alternatif hakemlerle iletişime geçilebilmesi için inceleme davetini reddetmelidir.

Gizlilik

İncelenmek için alınan tüm yazılar gizli belgelerdir ve bu şekilde ele alınmalıdır; Genel Yayın Yönetmeni tarafından izin verilmedikleri sürece (istisnai ve özel durumlarda bunu yapacak olanlar) başkalarıyla gösterilmemeli veya tartışılmamalıdır. Bu, inceleme davetini reddeden, davet edilen, gözden geçirenler için de geçerlidir.

Nesnellik standartları

İncelemeler objektif olarak yapılmalı ve gözlemler, yazarların makalenin iyileştirilmesi için kullanabilmeleri amacıyla destekleyici argümanlarla net bir şekilde formüle edilmelidir. Yazarların kişisel eleştirisi uygunsuzdur.

Kaynakların kabulü

Hakemler, yazarlar tarafından atıfta bulunulmamış ilgili yayınlanmış çalışmaları belirlemelidir. Önceki yayınlarda rapor edilmiş bir gözlem, türetme veya argüman olan herhangi bir ifadeye ilgili alıntı eşlik etmelidir. Bir hakem ayrıca, incelenmekte olan makale ile hakkında kişisel bilgi sahibi oldukları (yayınlanmış veya yayınlanmamış) herhangi bir diğer makale arasındaki herhangi bir önemli benzerlik veya örtüşmeyi editörlere bildirmelidir.

Açıklama ve çıkar çatışmaları

Makaleye bağlı yazarlar, şirketler veya kurumlarla rekabet, işbirlikçi veya diğer ilişkilerden kaynaklanan çıkar çatışmaları olan davet edilen hakemler, editörleri derhal çıkar çatışmalarını beyan etmeleri ve alternatif hakemlerle iletişime geçebilmeleri için inceleme davetini reddetmeleri konusunda bilgilendirmelidir.

Gönderilen bir yazıda açıklanan yayınlanmamış materyaller, yazarların açık yazılı izni olmadan bir eleştirmenin kendi araştırmasında kullanılmamalıdır. Akran incelemesi yoluyla elde edilen ayrıcalıklı bilgiler veya fikirler gizli tutulmalı ve gözden geçirenin kişisel avantajı için kullanılmamalıdır. Bu, inceleme davetini reddeden, davet edilen, gözden geçirenler için de geçerlidir.

Yazarların Görevleri

Raporlama standartları

Orijinal araştırmanın yazarları, yapılan eserin ve sonuçların doğru



bir açıklamasını sunmalı ve ardından çalışmanın öneminin objektif bir tartışmasını sunmalıdır. Yazı, başkalarının eseri çoğaltmasını izin verecek yeterli ayrıntı ve referanslar içermelidir. İnceleme makaleleri doğru, objektif ve kapsamlı olmalı, editöryal 'görüş' veya perspektif parçaları açıkça bu şekilde tanımlanmalıdır. Hileli veya bilerek yanlış ifadeler etik olmayan davranışlar teşkil eder ve kabul edilemez.

Veri erişimi ve saklama

Yazarlardan, çalışmalarının ham verilerini editöryal inceleme için yazı ile birlikte sağlamaları istenebilir ve uygulanabilirse verileri kamuya açık hale getirmeye hazır olmalıdır. Her halükarda, yazarlar, katılımcıların gizliliğinin korunması ve özel verilerle ilgili yasal hakların serbest bırakılmasını engellememesi koşuluyla, bu verilerin yayımlandıktan sonra en az 10 yıl süreyle (tercihen kurumsal veya konu tabanlı veri deposu veya diğer veri merkezi aracılığıyla) diğer yetkili profesyonellere erişilebilirliğini sağlamalıdır.

Özgünlük ve intihal

Yazarlar sadece tamamen orijinal eserler yazdıklarından ve sunduklarından ve başkalarının çalışmalarını ve/veya sözlerini kullanmışlarsa, bunun uygun şekilde atıfta bulunulduğunu sağlamalıdır. Yazıda bildirilen eserin niteliğinin belirlenmesinde etkili olan yayınlar da belirtilmelidir. İntihal, başka bir makalenin "yazarın kendi makalesi" olarak "aktarılmasından", başka bir makalenin önemli bölümlerini kopyalamaya veya paraphrasinge (atıf yapmadan), başkaları tarafından yapılan araştırmadan elde edilen sonuçların iddiasına kadar pek çok biçim alır. Tüm biçimlerinde intihal etik olmayan yayıncılık davranışı teşkil eder ve kabul edilemez.

Çoklu, yinelenen, gereksiz veya eşzamanlı gönderim/yayın

Temelde aynı araştırmayı açıklayan bildiriler birden fazla dergide veya birincil yayında yayınlanmamalıdır. Bu nedenle, yazarlar daha önce başka bir dergide yayınlanmış bir makaleyi değerlendirilmek üzere göndermemelidir. Bir makalenin aynı anda birden fazla dergiye gönderilmesi etik dışı bir yayın davranışdır ve kabul edilemez.

Bazı makale türlerinin (klinik kılavuzlar, çeviriler gibi) birden fazla dergide yayınlanması, belirli şartların karşılanması koşuluyla bazen haklı görülebilir. İlgili dergilerin yazarları ve editörleri, birincil belgenin aynı verilerini ve yorumunu yansıtmaması gereken ikincil yayını kabul etmemelidir. Birincil referans, ikincil yayında belirtilmelidir.

Makalenin yazarlığı

Sadece bu yazarlık kriterlerini karşılayan kişiler, içeriğin kamuya açık sorumluluğunu üstlenebilmeleri için makalede yazar olarak listelenmelidir: (i) çalışmanın anlaşılmasına, tasarımına, yürütülmesine, veri edinilmesine veya analizine/yorumlanmasına önemli katkılarda bulunmuştur; ve (ii) yazının hazırlanması veya önemli entelektüel içerik için eleştirel olarak revize edilmesi; ve (iii) gazetenin son halini görmüş ve onaylamış ve yayımlanmak üzere sunulmasını kabul etmiş ve kabul etmiş. Yazıda bildirilen eserin önemli katkıları olan (teknik yardım, yazma ve düzenleme yardımı, genel destek gibi) ancak yazarlık kriterlerini karşılamayan kişilerin yazar olarak listelenmemesi, yazılı izin alındıktan sonra "Bildirimler" bölümünde kabul edilmesi gerekmektedir. İlgili yazar, tüm uygun ortak yazarların (yukarıdaki tanıma göre) ve uygunsuz ortak yazarların yazar listesine dahil edilmemesini sağlamalı ve tüm ortak yazarların makalenin son halini görüş onayladığını ve yayına sunulmasını kabul ettiğini doğrulamalıdır.

Açıklama ve çıkar çatışmaları

Yazarlar mümkün olan en erken aşamada (genellikle gönderim sırasında bir açıklama formu göndererek ve makaleye bir ifade de dahil olmak üzere), sonuçları veya makaledeki yorumlarını etkilemek için yorumlanabilecek çıkar çatışmalarını ifşa etmelidir. Açıklanması gereken potansiyel çıkar çatışmalarına örnek olarak, fahri, eğitim hibeleri veya diğer finansman, konuşmacı bürolarına katılım, üyelik, istihdam, danışmanlık, hisse senedi sahipliği veya diğer hisse senedi çıkarları ile ücretli uzman ifadeleri veya patent lisanslama düzenlemeleri ile kişisel veya mesleki ilişkiler, ilgili kişiler, bilgi veya inançlar gibi finansal olmayan konular veya makalede tartışılan materyaller verilebilir. Çalışma için tüm finansal destek kaynakları açıklanmalıdır (hibe numarası veya varsa diğer referans numarası da dahil olmak üzere).

Kaynakların kabulü

Yazarlar, başkalarının çalışmalarını doğru bir şekilde kabul ettiklerinden emin olmalı ve bildirilen eserin niteliğini belirlemede etkili olan yayınlara da atıfta bulunulmalıdır. Özel olarak elde edilen bilgiler (üçüncü şahıslarla konuşma, yazışma veya tartışma) kaynaktan açık, yazılı izin alınmadan kullanılmamalı veya rapor edilmemelidir. Yazarlar, bu hizmetlerde yer alan eserin yazarının açık yazılı iznini almamışsa, yazılara hakemlik veya hibe başvuruları gibi gizli hizmetlerin sağlanmasında elde edilen bilgileri kullanmamalıdır.

Tehlikeler ve insan veya hayvan denekleri

Çalışma, kullanımlarında olağandışı tehlikeler etüt eden kimyasallar, prosedürler veya ekipmanlar içeriyorsa, yazarlar bunları yazıda açıkça tanımlamalıdır. Eğer çalışma hayvanların veya insan katılımcıların kullanımını içeriyorsa, yazarlar tüm prosedürlerin ilgili yasalara ve kurumsal önergelere uygun olarak gerçekleştirildiğinden emin olmalı; yazı bu yönde bir ifade içermelidir. Yazarlar ayrıca, insan katılımcılarla deneyler için bilgilendirilmiş onam alındığına dair bir ifadeyi de makaleye eklemelidir. İnsan katılımcıların gizlilik haklarına her zaman uyulmalıdır.

Akran incelemesi

Yazarlar, editörlerin ham veri, açıklama ve etik onayı, hasta onayı ve telif hakkı izinleri için isteklerine derhal yanıt vererek akran değerlendirme sürecine katılmak ve tam işbirliği yapmak zorundadırlar. İlk olarak "revizyon gerekli" kararı verilmesi durumunda yazarlar, hakemlerin yorumlarına sistematik olarak, her noktasına zamanında yanıt vererek, makalelerini verilen son tarihe kadar gözden geçirip dergiye yeniden göndermemelidir.

Yayınlanan çalışmalardaki temel hatalar

Yazarlar kendi yayınlanmış çalışmalarında önemli hatalar veya yanlışlıklar bulduklarında, derginin editörlerini veya yayımcısını derhal bilgilendirmek ve çalışmayı bir hata biçiminde düzeltmek veya geri çekmek için onlarla işbirliği yapmak onların yükümlülüğüdür. Editörler veya yayıncı, yayınlanmış bir çalışmanın önemli bir hata veya yanlışlık içerdiğini üçüncü bir taraftan öğrenirse, makalenin doğruluğunu dergi editörlerine derhal düzeltmek veya geri çekmek veya dergi editörlerine kanıt sunmak yazarların yükümlülüğüdür.



INSTRUCTIONS to AUTHORS

Karaelmas Science and Engineering Journal is the international scientific journal publishing original papers in English or Turkish, reviews, short communications, technical notes and scientific editorial letters of science in the following areas: basic sciences, basic medicine science and engineering fields. This journal publishes two times a year (June and December). Manuscripts should be submitted online by a website: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen>

Manuscript Categories:

Research articles: Manuscripts should report original information which have not been published or submitted previously. Articles should not exceed 20 printed papers including tables and figures.

Review articles: Reviews of recent developments in a research fields and ideas will be accepted. Manuscripts should not exceed 15 papers of printed text. The use of tables and figures to summarize critical points is encouraged.

Short communications: These include small-scale investigations, innovative methods, perspectives on existing laboratory techniques and new methodologies, clinical trials and epidemiological studies. It should no exceed 5 printed pages.

Technical notes or Case Reports: Scientific reports providing important contributions their area will be considered in this category. It should not be exceed 3 pages.

Letters to editor: These include opinions, news and suggestions. Letters should not exceed 2 pages.

Book/Software Reviews: Short but concise description of the book/software, not exceeding a page. These types are not peer reviewed.

CONDITIONS FOR PUBLICATION

Journal articles are published in Turkish or English. Manuscript should be suitable to the formal criteria of Instructions to Authors, otherwise, the manuscript will be sent back to the authors. Manuscripts should not exceed 20 papers of printed text, including tables, figures and references. Manuscripts that are found suitable for peer review will be assigned to two expert reviewers. The final decision to accept or reject a manuscript will be made by the Editor-in-Chief. After review process, the Editor-in-Chief will inform the authors of acceptance, rejection or necessity of revision of the manuscript. The paper has not already been published elsewhere and it is not currently being considered for publication elsewhere. If accepted, Karaelmas Science and Engineering Journal have exclusive license to publish. Review process is three months.

THE REFEREE PROCESS

Manuscripts that do not comply with the journal's guidelines will be returned to the authors without scientific evaluation. Articles submitted in accordance with the journal's guidelines are reviewed by the Editor-in-Chief or Assistant Editor, who will appoint them to referees. The review process is one-blind. The Editor writes the decision letter in line with the recommendations of the referees, the opinions of the field editors and the contribution of the publication

to the literature. All unexamined manuscripts are returned within 10 days, and the decision letters of the manuscripts are sent within 3-6 months.

PRESENTATION

Papers should be submitted online.

PREPARING MANUSCRIPTS

- Manuscripts should be written double space on A4 sized typing paper with 2.5 cm all margins.
- Text should be prepared using Microsoft Word Processor with Times New Roman font and 12 point size.
- All pages must be numbered. All lines must be numbered.
- The full paper should be divided in to following parts in order to Abstract, Introduction, Materials and Method/Methods (Area descriptions, Study materials, e.g. should be cited as subheadings), Results, Discussion/Conclusions or Recommendations, Acknowledgements and References. All sections must be numbered except for the Abstract.
- Latin expression should be typed in italics.

Cover Letter: Please indicate title of manuscript and authors. You may briefly explain your work.

Title Page: The article should have a title page as a separate word file; hood; full author's full name, institutions and ORCID IDs; contact address and e-mail address of the corresponding author.

The Title: The title should be as short as possible, but give adequate information regarding the contents. Title must be written on the center with bold 14 font size. The first letter must be capital and the others must be written as lower case.

Author's Names and Addresses: All Authors full names must be written as lower case with bold 12 font size in the middle. After authors name and surnames, authors addresses should be stated with superscript numbers (e.g. ^{1 2 3}). Corresponding author's full name should be marked with an asteriks (*). All authors addresses must be typed with lower case 10 font in the center. The corresponding author's contact address and e-mail address should be given. Names of institutions and cities each authors also must be stated.

Abstract and Keywords: A brief, informative abstract, not exceeding 250 words, should be typed in 10 font size. Immediately following the Turkish and English abstract, authors should provide 4-6 keywords or phrases that reflect content of the article.

The Abstract Paper:

1. Turkish Paper
 - a) Turkish Title
 - b) English Title
 - c) Author's names in Turkish
 - d) ORCID
 - e) Addresses in Turkish
 - f) Abstract
 - g) Keywords in Turkish
 - h) English Abstract (suitable with Turkish Abstract)
 - i) English Keywords



2. English Paper

- | | |
|-------------------------|---|
| a) English Title | f) Abstract in English |
| b) Turkish Title | g) Keywords |
| c) Author's names | h) Turkish Abstract (Öz) |
| d) ORCID | i) Turkish Keywords (Anahtar Kelimeler) |
| e) Addresses in English | |

Main Text: Main Headings and subheadings should be informative, must be typed in capital, bold 12 font size. Subheadings should be written in lower case, 10 font size. Main headings should not be numbered in the manuscript.

Introduction: This section should include the topic and importance of the article and prior works.

Material and Methods: Experimental methods and procedures should be described with clear and brief explanations.

Results: This section contain only findings, no writing comment. Results can be supports by tables, figures, graphics etc., if necessary.

Discussion: Results should be compare with other studies and discuss similarity and distinction.

Acknowledgements: It should be grants, funds, peoples reviewing the manuscript and must be placed before thr references.

Any conflict of interest, financial support, authors' contribution statement, donation and other editorial (statistical analysis, English / Turkish evaluation) and / or technical assistance should be submitted at the end of the text.

Referencing: Please do not use unpublishing data. But MSc and PhD thesis can be use as references. References in the text:

If they have one author (Reşat 2001, Landen 2002)

Two authors (e.g.: Büyükgüzel and Yazgan 2004, Ünlü and Gerçek 2003);

In the case of multiple authors they should be cited as (Landen et al. 2002, Yılmaz et al. 2007). Multiple citations (Smith 1996, Yılmaz et al. 2007, Jones 2008), multiple publications by same author(s) should be written as (Smith et al. 1996a, 1996b, 1997). Software should be cited as (PROC GLM, SAS Institute 1999).

References should be given at the end of the text according to alphabetical order of the first authors surname.

References should appeared at the end of the text as in the examples provided below:

Journal Articles:

Büyükgüzel, K., Tunaz, H., Putnam, SM., Stanley, DW. 2002. Prostaglandin biosynthesis by midgut tissue isolated from the Tobacco Hornworm, *Manduca secta*. *Insect Biochem. Mol. Biol.*, 32: 435-443.

Büyükgüzel, K., Yazgan, Ş. 1996. Bazı antibiyotiklerin endoparazitoid *Pimpla turionellae* L. (Hymenoptera: Ichneumonidae)'nın yaşama ve gelişimine etkileri. *Turk. J. Zool.*, 20: 1-7.

Özer, M., Uzuntarla, M. 2008. Effects of the network structure and coupling strength on the noise-induced response delay of a neuronal network. *Phys. Let. A*, 372: 4603-4609.

A Book:

Reşat, U. 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. 4. Basım, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Nitelik Matbaacılık, Ankara, 385 s.

Sanford, RJ. 2003. Principles of fracture mechanics, Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, USA, 404 pp.

A Chapter in a Book:

Cheeseman, KH. 1993. Lipid peroxidation in biological systems, In: Halliwell B., Auroma OI. [eds.], DNA and Free Radicals. Ellis Horwood, London, pp. 12-17.

A Report:

Makarewicz, JC., Lewis, T., Bertram, P. 1995. Epilimnetic phytoplankton and zooplankton biomass and species composition in Lake Michigan, 1983-1992. U.S. EPA Great Lakes National Program, Chicago, IL. EPA 905-R-95-009.

Conference Proceedings:

Stock, A. 2004. Signal transduction in bacteria. *In the Proceedings of the 2004 Markey Scholars Conference*, pp: 80-89.

Kaplan, A. 2000. Ankara havasında bulunan biyolojik partiküller. XV. Ulusal Biyoloji Kongresi, s. 45-50, Ankara.

A Thesis:

Strunk, JL. 1991. The extraction of mercury from sediment and the geochemical partitioning of mercury in sediments from Lake Superior, M. Sc. thesis, Michigan State Univ., East Lansing, MI, 119 pp.

Özcan, A. 2006. Endüstriyel atıklar ve polipropilen lif içeren saha betonlarının özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 70 s.

In Press:

Evans, MA. 2002. Title. *Journal*. (in press).

Software:

SAS Institute. 2001. PROC user's manual, version 6th ed. SAS Institute. Cary, NC.

Internet and URL:

If author(s) obtained from some information from internet, should be write full web address in the reference section.

Web documents with no authors:

Leafy seadragons and weedy seadragons 2001. <http://www.windspeed.net.au/jenny/seadragons/>

Web document with author:

Dawson, J., Smith, L., Deubert, K. 31 October 2002. Referencing, not plagiarisim. <http://studytrekk.lis.curtin.edu.au/>

Symbols and Units: Metric systems or SI units should be used (kPa, kN/m³, g/cm², m/sn, g/m³, e.g.). Current abbreviations can be used without explanation, others must be explained. Use “ % ” only with numerals and in tables and figures. Close up space to numerals (e.g. 60%). Use the dot for decimal units (e.g. 10.26).



Abbreviations: All acronyms/abbreviations must be explained in parenthesis after their first occurrence. If many unfamiliar acronyms/abbreviations are used, please compile them in an “Abbreviations” section at the end of the paper.

Use the following abbreviations for time: h (hour), min (minute), s (second), yr (year), mo (month), wk (week), add “s” to create plurals (e.g. wks). Do not abbreviate “liter” by itself or when accompanied by a numeral.

Dates: Present dates in this format: day month year (e.g. 13 February 1998).

Gene Sequencing: Genbank may be conducted at their website at <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Genbank/submit.html>.

Tables and Figures:

- Tables and figures captions must be written in separate pages in Table Legends and Figure Legends sections after the reference section.
- Tables and figures should be embedded in separate papers and must be numbered consecutively throughout the paper (Table 1, Fig. 1, Figs. 2-3, Fig. 4).
- Use a semicolon to separate different types of citations (Fig. 3; Table 3)
- Electronically submitted figures and graphs are preferred *.jpg or *.tiff (min. 600 dpi) formats. Do not give magnification on scales in the figure titles; instead draw bar scales directly on the figures.
- All the tables and figures must be referred in the text.
- The numbers and headings of figures must be written below the figure.
- The numbers and headings of tables should be written the top of the table.
- Standart errors or deviations should be cited as (e.g., 1.45 ± 1.06), statistically data should data must be given as (e.g., 734.3ab) in the table.
- Figures must be uploaded as tiff or jpeg files on our web sites on supplementary files.
- The column title of standart errors or deviations must be cited as (means \pm SD, or means \pm SE).
- Use the following abbreviations for months: Jan., Feb., Mar., April, May, Jun., July, Aug., Sep., Oct., Nov., and Dec.

Appendices: All appendices must be typed on separate sheet and should be numbered consecutively with capital Roman numerals.

Equations: Mathematical expressions should be written by an equation editor (Word format) in 9 point size. Indices font should be 8 point size. Each equation in text should be numbered in parenthesis.

Mathematical equations should be cited as below:

$$R = A_{\text{barrtype}} + B \log_{10}(f) \quad (2)$$

When authors send mathematical papers, they should state AMS-Mathematical Subject Classification Number.

Numbers: Spell out numbers at the beginning of sentence. Spell out the numbers one through nine. 10 and up are always cited as arabic numerals. All numbers <1 must be preceded by a zero (e.g. P<0.05). When a number is >1000, use a comma to separate hundreds from thousands.

Footnotes to Tables: In case of statistical data in tables, use footnotes to define or clarify column headings or specific datum with in data field (*P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; NS, not significant).

For submitting first namely author’s manuscripts should not exceed three folds in the same issue. Authors when submit the four folds manuscripts, they will be publish in another issues.

The preparation of the manuscript should be as follows for Mathematics and related subject:

The first page of the manuscript must include at least one 2010 MSC (Mathematics Subject Classification) numbers following the annual index of the Mathematical Reviews. MSC Subject Classification can be obtained from “<http://www.ams.org/mathscinet/msc/msc2010.html>”.

The items in the reference section should be ordered according to the alphabetical order of the surnames of the authors and numbered numerically such as [1], [2],....

In the text, reference numbers should be enclosed in square brackets, such as [23] or [12]-[15], to distinguish them from formula numbers which should be quoted in round brackets.

Final Checklist of the Manuscript

Before submitting of your paper (and other writings as applicable), please make sure that the following requirements have all been made:

- Cover letter is enclosed
- Spell check and grammar check have been performed
- Entire paper is double-spaced including abstract, tables, captions, references
- Margins are 2.5 cm each marigin
- Font size is 12 punto
- Font type is Times new roman
- Decimals are shown by a full stop (e.g., 10.25)
- Percent signs appear without a space after the number (e.g., 63%)
- Names of authors are written in full (not abbreviated)
- Address is given
- English title is given
- Title is in title case
- English abstract is given
- English keywords are given
- Turkish abstract (Öz) is given
- Turkish keywords (Anahtar Kelimeler) are given
- Original figures are enclosed
- Figures are prepared according to the instructions
- Figures are maximum 16x20 cm; minimum 8 cm wide
- Figures are refered to the consecutively in the paper
- Tables are maximum 16x20 cm; minimum 8 cm wide
- Tables are refered to the consecutively in the paper
- Captions are written in left case
- Figure legends are given
- Table legends are given
- References are typed according to the instructions
- References are listed alphabetically
- All pages and all lines are numbered



ETHICAL PRINCIPLES

Official journal of Zonguldak Bülent Ecevit University, Karaelmas Science and Engineering Journal is a peer-reviewed journal which aims to reach all national and international institutions and individuals free of charge.

In the scientific articles sent to our journal, the recommendations of ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors) and the International Standards of COPE (Committee on Publication Ethics) for Editors and Authors are taken into consideration.

All claims and finalized processes regarding ethical violations of our authors are under their own responsibility, and in case of ethical violations, the article is automatically canceled.

Ethical Guidelines for Peer Reviewers

Peer Reviewers,

- respect the confidentiality of the manuscript, do not discuss it and do not reveal any details of it.
- inform the editor about any conflict of interest.
- provide objective and constructive explanations for their suggestions.
- do not allow the decisions related to the article to be influenced by the subject of the manuscript or the way of writing.
- do not contact the authors directly and request their previous articles unless there is a strong scientific reason.
- do not duplicate any part of the article or information reviewed in any of their own work before it is published by the authors.
- agree to accept the reviews only within their expertise and finish the review process within a reasonable time.
- do not intentionally prolong the review process which leads to a delay for the publication of the article.
- use a language refrained from being hostile and avoids making derogatory personal comments.
- destroy the manuscript and associated material after reviewing.

https://publicationethics.org/files/Ethical_guidelines_for_peer_reviewers_0.pdf

Ethical Guidelines for Authors

Authors and co-authors,

- meet the following criteria for authorship defined by International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE);
 - a. Substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data for the work;
 - b. Drafting the work or revising it critically for important intellectual content;

- c. Final approval of the version to be published;
- d. Agreement to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.
- ensure that submitted articles are original and are not sent to different publishers.
- are responsible for any falsification, alteration or plagiarism which are defined as abusing research before or during the research or while reporting the findings of it.
- inform the editor if there is any conflict of interest in the submitted articles.
- inform the editor for correction or withdrawal if any mistake is noticed after publication or during the process of pre-control or evaluation.
- do not suggest reordering, adding or dropping author names after article submission.
- state, if the research requires the decision of the ethics committee, that they have the ethics committee approval with the name of the ethics committee and the date and number of the decision in the first and last page of the article and the methods section, also upload the ethics committee approval document to the system along with the application of the article.
- state in the article that they have the consent form for the case reports.
- comply with the copyright regulations for the ideas and works of art used in the article.
- provide statements for Author Contribution, Conflict of Interest, Disclosure and if necessary, Acknowledgements.

<http://www.icmje.org/icmje-recommendations.pdf>

https://www.ease.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/doi.10.20316.ESE_.2018.44.e1.tr_.pdf

Ethical Guidelines for Editors

Editors:

- The readers should be informed about who provides financial support to the study or other scientific studies and whether there is any role of sponsors in the study or publication, and if there is any, what the contribution is.
- Editors should base their decisions of acceptance or rejection on the importance, originality and clarity of the article, validity of study and its relevance to the remit of the journal.
- Editors should not reverse decisions to accept submissions unless serious problems are identified with the submission.



- New editors should not overturn decisions to publish submissions made by the previous editor unless serious problems are identified.
- A description of peer review processes should be published, and editors should be ready to justify any important deviation from the described processes.
- Journals should have a declared mechanism for authors to appeal against editorial decisions.
- Editors should publish guidance to authors on everything that is expected of them. This guidance should be regularly updated and should refer or link to this code.
- Editors should state the authorship criteria suggested by International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE).
- Editors should provide guidance to reviewers on everything that is expected of them including the need to handle submitted material in confidence. This guidance should be regularly updated and should refer or link to this code
- Editors should require reviewers to disclose any potential competing interests before agreeing to review a submission.
- Editors should have systems to ensure that peer reviewers' identities are protected unless they use an open review system that is declared to authors and reviewers.
- Editors should provide new editorial board members with guidelines on everything that is expected of them and should keep existing members updated on new policies and developments.
- Editors should make decisions on which articles to publish based on quality and suitability for the journal and without interference from the journal owner/publisher.
- Editors should have a written contract(s) setting out their relationship with the journal's owner and/or publisher. The terms of this contract should be in line with the COPE Code of Conduct for Journal Editors.
- Editors should strive to ensure that peer review at their journal is fair, unbiased and timely.
- Editors should have systems to ensure that material submitted to their journal remains confidential while under review.
- Editors should take all reasonable steps to ensure the quality of the material they publish, recognizing that journals and sections within journals will have different aims and standards.

<https://publicationethics.org/files/Code%20of%20Conduct.pdf>



PUBLICATION ETHICS

The ethics statement of the Karaelmas Science and Engineering Journal is based on the Code of Conduct guidelines of the Committee on Publication Ethics (COPE), available at www.publicationethics.org.

This journal follows the COPE Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and the Code of Conduct for Journal Publishers.

Duties of Editors

Fair play and editorial independence

Editors evaluate submitted manuscripts exclusively on the basis of their academic merit (importance, originality, study's validity, clarity) and its relevance to the journal's scope, without regard to the authors' race, gender, sexual orientation, ethnic origin, citizenship, religious belief, political philosophy or institutional affiliation. Decisions to edit and publish are not determined by the policies of governments or any other agencies outside of the journal itself. The Editor-in-Chief has full authority over the entire editorial content of the journal and the timing of publication of that content.

Confidentiality

Editors and editorial staff will not disclose any information about a submitted manuscript to anyone other than the corresponding author, reviewers, potential reviewers, other editorial advisers, and the publisher, as appropriate.

Disclosure and conflicts of interest

Editors and editorial board members will not use unpublished information disclosed in a submitted manuscript for their own research purposes without the authors' explicit written consent. Privileged information or ideas obtained by editors as a result of handling the manuscript will be kept confidential and not used for their personal advantage. Editors will recuse themselves from considering manuscripts in which they have conflicts of interest resulting from competitive, collaborative, or other relationships/connections with any of the authors, companies or institutions connected to the papers; instead, they will ask another member of the editorial board to handle the manuscript.

Publication decisions

The editors ensure that all submitted manuscripts being considered for publication undergo peer-review by at least two reviewers who are expert in the field. The Editor-in-Chief is responsible for deciding which of the manuscripts submitted to the journal will be published, based on the validation of the work in question, its importance to researchers and readers, the reviewers' comments, and such legal requirements as are currently in force regarding libel, copyright infringement and plagiarism. The Editor-in-Chief may confer with other editors or reviewers in making this decision.

Involvement and cooperation in investigations

Editors (in conjunction with the publisher and/or society) will take responsive measures when ethical concerns are raised with regard to a submitted manuscript or published paper. Every reported act of unethical publishing behaviour will be looked into, even if it is discovered years after publication. Editors follow the COPE Flowcharts when dealing with cases of suspected misconduct. If, on investigation, the ethical concern is well-founded, a correction, retraction, expression of concern or other note as may be relevant, will be published in the journal.

Duties of Reviewers

Contribution to editorial decisions

Peer review assists editors in making editorial decisions and, through editorial communications with authors, may assist authors in improving their manuscripts. Peer review is an essential component of formal scholarly communication and lies at the heart of scientific endeavour.

Promptness

Any invited referee who feels unqualified to review the research reported in a manuscript or knows that its prompt review will be impossible should immediately notify the editors and decline the invitation to review so that alternative reviewers can be contacted.

Confidentiality

Any manuscripts received for review are confidential documents and must be treated as such; they must not be shown to or discussed with others except if authorized by the Editor-in-Chief (who would only do so under exceptional and specific circumstances). This applies also to invited reviewers who decline the review invitation.

Standards of objectivity

Reviews should be conducted objectively and observations formulated clearly with supporting arguments so that authors can use them for improving the manuscript. Personal criticism of the authors is inappropriate.

Acknowledgement of sources

Reviewers should identify relevant published work that has not been cited by the authors. Any statement that is an observation, derivation or argument that has been reported in previous publications should be accompanied by the relevant citation. A reviewer should also notify the editors of any substantial similarity or overlap between the manuscript under consideration and any other manuscript (published or unpublished) of which they have personal knowledge.

Disclosure and conflicts of interest

Any invited referee who has conflicts of interest resulting from competitive, collaborative, or other relationships or connections with any of the authors, companies or institutions connected to the



manuscript and the work described therein should immediately notify the editors to declare their conflicts of interest and decline the invitation to review so that alternative reviewers can be contacted.

Unpublished material disclosed in a submitted manuscript must not be used in a reviewer's own research without the express written consent of the authors. Privileged information or ideas obtained through peer review must be kept confidential and not used for the reviewer's personal advantage. This applies also to invited reviewers who decline the review invitation.

Duties of Authors

Reporting standards

Authors of original research should present an accurate account of the work performed and the results, followed by an objective discussion of the significance of the work. The manuscript should contain sufficient detail and references to permit others to replicate the work. Review articles should be accurate, objective and comprehensive, while editorial 'opinion' or perspective pieces should be clearly identified as such. Fraudulent or knowingly inaccurate statements constitute unethical behaviour and are unacceptable.

Data access and retention

Authors may be asked to provide the raw data of their study together with the manuscript for editorial review and should be prepared to make the data publicly available if practicable. In any event, authors should ensure accessibility of such data to other competent professionals for at least 10 years after publication (preferably via an institutional or subject-based data repository or other data centre), provided that the confidentiality of the participants can be protected and legal rights concerning proprietary data do not preclude their release.

Originality and plagiarism

Authors should ensure that they have written and submit only entirely original works, and if they have used the work and/or words of others, that this has been appropriately cited. Publications that have been influential in determining the nature of the work reported in the manuscript should also be cited. Plagiarism takes many forms, from "passing off" another's paper as the author's own, to copying or paraphrasing substantial parts of another's paper (without attribution), to claiming results from research conducted by others. Plagiarism in all its forms constitutes unethical publishing behaviour and is unacceptable.

Multiple, duplicate, redundant or concurrent submission/publication

Papers describing essentially the same research should not be published in more than one journal or primary publication. Hence, authors should not submit for consideration a manuscript that has already been published in another journal. Submission of a manuscript concurrently to more than one journal is unethical publishing behaviour and unacceptable.

The publication of some kinds of articles (such as clinical guidelines, translations) in more than one journal is sometimes justifiable,

provided that certain conditions are met. The authors and editors of the journals concerned must agree to the secondary publication, which must reflect the same data and interpretation of the primary document. The primary reference must be cited in the secondary publication.

Authorship of the manuscript

Only persons who meet these authorship criteria should be listed as authors in the manuscript as they must be able to take public responsibility for the content: (i) made significant contributions to the conception, design, execution, data acquisition, or analysis/interpretation of the study; and (ii) drafted the manuscript or revised it critically for important intellectual content; and (iii) have seen and approved the final version of the paper and agreed to its submission for publication. All persons who made substantial contributions to the work reported in the manuscript (such as technical help, writing and editing assistance, general support) but who do not meet the criteria for authorship must not be listed as an author, but should be acknowledged in the "Acknowledgements" section after their written permission to be named as been obtained. The corresponding author should ensure that all appropriate coauthors (according to the above definition) and no inappropriate coauthors are included in the author list and verify that all coauthors have seen and approved the final version of the manuscript and agreed to its submission for publication.

Disclosure and conflicts of interest

Authors should—at the earliest stage possible (generally by submitting a disclosure form at the time of submission and including a statement in the manuscript)—disclose any conflicts of interest that might be construed to influence the results or their interpretation in the manuscript. Examples of potential conflicts of interest that should be disclosed include financial ones such as honoraria, educational grants or other funding, participation in speakers' bureaus, membership, employment, consultancies, stock ownership, or other equity interest, and paid expert testimony or patent-licensing arrangements, as well as non-financial ones such as personal or professional relationships, affiliations, knowledge or beliefs in the subject matter or materials discussed in the manuscript. All sources of financial support for the work should be disclosed (including the grant number or other reference number if any).

Acknowledgement of sources

Authors should ensure that they have properly acknowledged the work of others, and should also cite publications that have been influential in determining the nature of the reported work. Information obtained privately (from conversation, correspondence or discussion with third parties) must not be used or reported without explicit, written permission from the source. Authors should not use information obtained in the course of providing confidential services, such as refereeing manuscripts or grant applications, unless they have obtained the explicit written permission of the author(s) of the work involved in these services.

Hazards and human or animal subjects

If the work involves chemicals, procedures or equipment that have any unusual hazards inherent in their use, the authors must clearly identify



these in the manuscript. If the work involves the use of animals or human participants, the authors should ensure that all procedures were performed in compliance with relevant laws and institutional guidelines and that the appropriate institutional committee(s) has approved them; the manuscript should contain a statement to this effect. Authors should also include a statement in the manuscript that informed consent was obtained for experimentation with human participants. The privacy rights of human participants must always be observed.

Peer review

Authors are obliged to participate in the peer review process and cooperate fully by responding promptly to editors' requests for raw data, clarifications, and proof of ethics approval, patient consents and copyright permissions. In the case of a first decision of "revisions necessary", authors should respond to the reviewers' comments systematically, point by point, and in a timely manner, revising and re-submitting their manuscript to the journal by the deadline given.

Fundamental errors in published works

When authors discover significant errors or inaccuracies in their own published work, it is their obligation to promptly notify the journal's editors or publisher and cooperate with them to either correct the paper in the form of an erratum or to retract the paper. If the editors or publisher learns from a third party that a published work contains a significant error or inaccuracy, then it is the authors' obligation to promptly correct or retract the paper or provide evidence to the journal editors of the correctness of the paper.



İÇİNDEKİLER

Araştırma Makaleleri

- Geliştirilmiş Kızıl Tilki Optimizasyon Algoritması ile Da-Da Alçaltıcı Tip Dönüştürücü PI Katsayılarının Optimizasyonu** 1
Ersagun Kürşat Yaylacı, Hatice Nur Özdeş, Ahmet Erdem Yılmaz
- Termoplastik Kompozit ve Lazer Uzaklaştırmalı Yüzey Ön İşlem Uygulanmış AA5754-H111 Arasındaki Bindirme Şeklinde Farklı Birleştirmelerin Kırılma Morfolojisi** 12
Nahit Öztoprak, Gökçe Mehmet Gençer
- “Metallerin ve Plastiklerin Yüzey İşlemi (STM)” Sektöründe Faaliyet Gösteren Tesislerin EKÖK Uyum Durumunun İl Bazında Değerlendirilmesi** 22
Mehmet Kazım Yetik, Rahman Çalhan
- Bor Karbür (B₄C) Katkılı Epoksi Esaslı Nanokompozitlerin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Seçimi** 35
Batuhan Özakin, Kürşat Gültekin, İlhan Çelik
- Kesit Geometrisinin ve Malzeme Tipinin Çarpışma Kutularının Enerji Emme Yeteneklerine Etkisi** 42
Ertan Köseadağ, Devrim İşler
- Elyaf Yöneliminin Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CETP)/PVC Sandviç Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi** 52
S. Bahar Baştürk
- Çam Balı Takviyeli Kitosan Esaslı Aktif Filmler** 62
Özge Kuyucak, Pınar Terzioğlu, Yusuf Sıcak
- Uzun Zincirli Kuaterner Amin Katyonik-Volkanit Üzerine Stronsiyum (II) İyonlarının Adsorpsiyonunun Araştırılması: RSM ile Modelleme ve Optimizasyon** 72
Ümit H. Kaynar, Sermin Çam Kaynar
- Bazı Gıda Örneklerinde Gama Spektrometresi İle Doğal ⁴⁰K Aktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesi** 85
Sermin Çam-Kaynar, İlayda Taner
- Linyit ve Taşkömürü Tozlarının Yanabilirlik ve Patlayabilirlik Açısından Değerlendirilmesi** 94
Emre Günay
- Dinamik Kavşak Yönetimi İçin Tek-Yönlü LiDAR Sensör ile Yol Yoğunluk Hesabı** 105
Abdulkadir Cildir, Mesud Kahrıman, Mesut Tigdemir
- Radye Plak Rijitliğinin Düşey Eksenel Yüklü Kazık Grubu Davranışına Etkisi** 118
Zehra Nil Kutlu, İsmail Emrah Kılıç, Mert Tolon
- TCSC ve SSSC Cihazları Kullanılarak Enterkonnekte İletim Sisteminin Gerilim ve Yüklenme Parametrelerinin Kontrolü: Örnek Güç Sistemi Uygulaması** 131
Umud Emre Uzun, Nihat Pamuk, Sezai Taşkın



Bitüm Modifikasyonda Atık Halı, Stiren Etilen Bütadien Stiren ve Elvaloy RET Kullanılarak Fiziksel Özelliklerin Geliştirilmesi	142
Pelin Akgül Bayraktaroğlu, Seyfullah Keyf	
Konya Apa Barajı Havzasında Meteorolojik ve Hidrolojik Kuraklık Trend Analizi	151
Türker Tuğrul, Mehmet Ali Hınıs	
Gaziantep İlinde Bazı Hava Kirlenmelerinin Ölçümü, Modellenmesi ve Değerlendirilmesi	164
Gökhan Yaman, Selman Türkeş, Hakan Güney, Ahmet Enver Sıvacı, Bülent Sarı, Olcayto Keskinan	
Ultra Geniş Bant Teknolojisi ile Kapalı Alanlarda Konum Belirleme	179
İbrahim Alışkan, Arif Şahin	
Paroksizmal Atriyal Fibrilasyonun 30 Dakikalık Kalp Hızı Değişkenliği Analizi Kullanılarak Teşhisinde Kalp Hızı ve Öznitelik Normalizasyon Yöntemlerinin Etkisi	191
Murat Sürücü, Yalçın İşler, Resul Kara	
Evsel Bir Mahalli Alan İçin Evler Arasında Esneklik Alışverişine İmkân Sağlayan Yeni Bir İşletim Stratejisinin Geliştirilmesi	205
F. Gülşen Erdiñ	
Derleme	
Antikanser Etkili Doğal Bir Bileşik: Bakteriyel Ekzopolisakkaritler	217
Volkan Kuzucu, Nazime Mercan Dogan	



CONTENTS

Research Articles

- Optimization of PI Coefficients Buck Converter with Improved Red Fox Optimization Algorithm 1**
Ersagun Kürşat Yaylacı, Hatice Nur Özdeş, Ahmet Erdem Yılmaz
- Fracture Morphology of Single-Lap Dissimilar Joints Between Thermoplastic Composite and AA5754-H111 with..... 12**
Laser Ablation Surface Pre-Treatment
Nahit Öztoprak, Gökçe Mehmet Gençer
- Provincial Assessment of IPPC Compliance Status of Facilities Operating in the “Surface Treatment of Metals and 22**
Plastics (STM)” Sector
Mehmet Kazım Yetik, Rahman Çalhan
- Selection of Boron Carbide (B₄C) Doped Epoxy Based Nanocomposites by Multi-Criteria Decision Making Methods..... 35**
Batuhan Özakın, Kürşat Gültekin, İlhan Çelik
- Effect of Section Geometry and Material Type on Energy Absorption Capabilities of Crash Boxes 42**
Ertan Köseadağ, Devrim İşler
- Effect of Fiber Orientation on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)/PVC 52**
Sandwich Composites
S. Bahar Baştürk
- Honey Incorporated Chitosan Based Active Films 62**
Özge Kuyucak, Pınar Terzioğlu, Yusuf Sıcak
- Investigation of Strontium (II) Ions Adsorption onto Long Chain Quaternary Amine Cationic-Volcanite: 72**
Modeling and Optimization by RSM
Ümit H. Kaynar, Sermin Çam Kaynar
- Determination of Natural ⁴⁰K Activity Concentrations in Some Food Samples by Gamma Spectrometer 85**
Sermin Çam-Kaynar, İlayda Taner
- Characterization of Lignite and Hardcoal Dusts in Terms of Flammability and Explosibility 94**
Emre Günay
- Road Density Calculations with Unidimensional LiDAR Sensor for Dynamic Intersection Management..... 105**
Abdulkadir Cildir, Mesud Kahrıman, Mesut Tigdemir
- Role of Slab Rigidity on the Behavior of Axially Loaded Pile Group 118**
Zehra Nil Kutlu, İsmail Emrah Kılıç, Mert Tolon
- Control of Voltage and Loading Parameters of Interconnected Transmission System Using TCSC and SSSC Devices: 131**
An Example Power System Application
Umut Emre Uzun, Nihat Pamuk, Sezai Taşkın
- Improvement of Physical Properties by Using Waste Carpet, Styrene Ethylene Butadiene Styrene and Elvaloy RET in..... 142**
Bitumen Modification
Pelın Akgül Bayraktaroğlu, Seyfullah Keyf



Trend Analysis of Meteorological and Hydrological Drought at Apa Dam (Konya) Basin.....	151
Türker Tuğrul, Mehmet Ali Hınıs	
Measurement, Modeling and Evaluation of Some Air Pollutants in Gaziantep Province	164
Gökhan Yaman, Selman Türkeş, Hakan Güney, Ahmet Enver Sıvacı, Bülent Sarı, Olcayto Keskinan	
Indoor Positioning System Based on Ultra-Wide-Band Technology	179
İbrahim Alışkan, Arif Şahin	
The Effect of Heart Rate and Feature Normalization Methods to Diagnose Paroxysmal Atrial Fibrillation Using	191
30-Minute Heart Rate Variability Analysis Murat Sürücü, Yalçın İşler, Resul Kara	
Development of a New Operation Strategy Enabling Transactions of Flexibility Among Households for a.....	205
Residential Neighborhood E. Gülşen Erdiñ	
Review	
A Natural Compound with Anti-Cancer Effect: Bacterial Exopolysaccharides.....	217
Volkan Kuzucu, Nazime Mercan Dogan	



Geliştirilmiş Kızıl Tilki Optimizasyon Algoritması ile Da-Da Alçaltıcı Tip Dönüştürücü PI Katsayılarının Optimizasyonu

Optimization of PI Coefficients Buck Converter with Improved Red Fox Optimization Algorithm

Ersagun Kürşat Yaylacı , Hatice Nur Özdeş* , Ahmet Erdem Yılmaz 

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Karabük, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, endüstride yaygın olarak kullanılan PI (Oransal-İntegral) denetleyici ile alçaltıcı tip da-da dönüştürücünün kapalı çevrim çıkış gerilim denetimi sağlanmıştır. Denetleyici katsayılarının belirlenmesinde matematiksel yöntemlerin yanı sıra son yıllarda meta-sezgisel yöntemler oldukça sık tercih edilmeye başlanmıştır. Kızıl Tilki Optimizasyon (KTO) yöntemi yakın zamanda meta-sezgisel yöntemlere eklenen yeni bir optimizasyon algoritmasıdır. Doğada sürü halinde yaşayan kızıl tilkilerin yaşayış biçimlerinden esinlenilerek geliştirilmiştir. Bu çalışmada KTO algoritması, sistemde daha az kullanıcı bilgisine ihtiyaç duyulması ve sistemin tasarım ölçütlerini aşmadan güvenilir bir şekilde çalışması amacıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen KTO algoritması kullanılarak PI denetleyici ile sistemin denetim performans kriterlerinden sürekli hal hatası ve maksimum aşım iyileştirilmeye çalışılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak; hata mutlak değerlerin toplamı, zamanla ağırlıklandırılmış hata karelerinin toplamı ve hata karelerinin toplamı değerlerinin ortalaması kullanılmıştır. Bu çalışma Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve maksimum aşım kriteri %5-40 aralığında belirlenmiştir. Yapılan geliştirme işlemi Gri Kurt Optimizasyon (GKO), Ateş Böceği Optimizasyon (ABO) ve Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) yöntemlerine de uygulanmış ve dört optimizasyon yöntemi karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma işleminde çalışma süresi bakımından geliştirilmiş GKO algoritmasının daha kısa sürede sonuca ulaştığı, denetleyici performanslarının ise birbirine oldukça yakın performans gösterdikleri gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geliştirilmiş kızıl tilki optimizasyon algoritması, PI denetleyici, Alçaltıcı tip da-da dönüştürücü

Abstract


In this study, closed-loop output voltage control of the Buck converter is provided with Proportional-Integral controller, which is widely used in the industry. In addition to mathematical methods in determining the controller coefficients, meta-heuristic methods have been started to be preferred quite frequently in recent years. The Red Fox Optimization method is a new optimization algorithm recently added to meta-heuristic methods. It was developed by being inspired by the lifestyles of the red foxes living in herds in nature. In this study, the Red Fox Optimization algorithm was developed in order to require less user information in the system and to operate the system reliably without exceeding the design criteria. By using the developed Red Fox Optimization algorithm, steady-state error and maximum overshoot, which are among the control performance criteria of the system, are tried to be improved with the Proportional-Integral controller. The objective function is calculated by taking the average of the sum of the absolute values of the error, the sum of the squares of the error, and the sum of the time-weighted squares of the error. This study is carried out in the Matlab/Simulink environment and the maximum overshoot criterion is specific as in the range of 5-40%. The development process is also applied to Grey Wolf Optimization (GWO), Firefly Optimization (FA) and Particle Swarm Optimization (PSO) methods and the four optimization methods are compared. In the comparison process, it was observed that the improved GKO algorithm reached the result in a shorter time in terms of the working time, and the controller performances were quite close to each other.

Keywords: Improved red fox optimization algorithm, PI controller, Buck converter

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: haticenur9878@gmail.com

Ersagun Kürşat Yaylacı  orcid.org/0000-0003-0358-5617

Hatice Nur Özdeş  orcid.org/0000-0002-3198-3412

Ahmet Erdem Yılmaz  orcid.org/0000-0002-8408-5536



1. Giriş

Son yıllarda meta-sezgisel yöntemler optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla tercih edilmektedir. Meta-sezgisel yöntemlerin birçoğu optimizasyon problemlerinde kullanılan diğer matematiksel yöntemlerden farklı olarak doğada sürü halinde yaşayan canlıların barınma ve avlanma gibi yaşamlarını devam ettirmek için sergiledikleri sezgisel hareketlerden esinlenilerek geliştirilmiştir. Buna ek olarak canlıların sürü içerisindeki birbirleri ile olan sosyal ağlarından esinlenilerek bu yöntemlere hafızalı bir yapı kazandırılmıştır. Bu yöntemlerden bazıları gri kurt optimizasyon (GKO), parçacık sürü optimizasyon (PSO), kızıl tilki optimizasyon (KTO) ve ateş böceği optimizasyon (ABO) algoritmalarıdır. (Mirjalili 2014, Özsağlam ve Çunkaş 2008, Połap ve Woźniak 2021b, Yang 2014).

GKO 2014 yılında geliştirilmiş, gri kurtların doğadaki avlanma şeklini ve sürü içi sosyal hiyerarşik yapısını konu alan meta-sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır (Mirjalili 2014). Bir diğer meta-sezgisel optimizasyon yöntemi olan PSO algoritması, sürü halinde hareket eden canlıların yaşayış biçimlerini modelleyen ve sıkça tercih edilen bir optimizasyon yöntemidir (Özsağlam ve Çunkaş 2008). Ateş böceklerinin flaş hareketlerinden esinlenilerek geliştirilmiş bir diğer meta-sezgisel algoritma olan ABO, 2008 yılında Xin-She Yang tarafından literatüre kazandırılmıştır (Yang 2014). KTO algoritması ise kızıl tilkilerin doğadaki yaşayış biçimlerinden (avlanma, beslenme, ...) esinlenilerek geliştirilmiş meta-sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır (Połap ve Woźniak 2021b). Kızıl tilki optimizasyon algoritması ve literatürdeki diğer farklı algoritmalar ile yapılan çalışmalar Çizelge 1 ile ifade edilmiştir.

Doğru akım uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir dönüştürücü tipi olan da-da dönüştürücü (Buck Converter, BC), girişine uygulanan gerilimi anahtarlama elemanları sayesinde çıkışına düşürerek veren bir alçaltıcı dönüştürücü tipidir. BC devresi üzerinde anahtarlama elemanı olarak genellikle MOSFET veya IGBT kullanılmaktadır. BC devresinin çıkış geriliminin kontrolü, devrenin kullanılabilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. Endüstride doğru akım dönüştürücülerinin genelinde çıkış gerilim kontrolünü sağlamak için PI, PID (Oransal İntegral Türevsel) ve PD (Oransal Türevsel) denetleyiciler kullanılmaktadır (MadhuKiran vd. 2012, Shagor vd. 2021, Hekimoğlu vd. 2018, Penbegüllü 2019, Murdianto vd. 2018). Bahsedilen çalışmaların bir tanesinde Ericsson BMR450'nin BC sisteminin geri besleme döngüsünde Polinom, PID ve PD denetleyicileri ayrı ayrı uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış-

tır (MadhuKiran vd. 2012). İ. Penbegüllü ise çalışmasında BC devresine, katsayıları optimize edilmiş PID denetleyici uygulamıştır (Penbegüllü 2019). Farid Dwi Murdianto ve çalışma arkadaşları sistemde kullanılan BC devresine PI denetleyici uygulamışlardır (Murdianto vd. 2018).

Bu çalışmada BC devresinin çıkış gerilim kontrolü için kullanılan PI denetleyicinin katsayıları KTO algoritması tabanlı bir geliştirilmiş kızıl tilki optimizasyon algoritması (GKTO) kullanılarak optimum değerlerde seçilmiştir. Literatürde henüz KTO yönteminin bu amaçla kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dahası, GKTO algoritmasında yapılan geliştirme işlemi ile arama uzayının sınırlarının belirlenmesinde kullanıcı bilgisine ihtiyaç duymaksızın algoritma tarafından optimum sınırlar bulunmaktadır. Bununla birlikte GKTO algoritmasında performans kriterlerinden birisi olan maksimum aşım değeri de hesaba katılmış ve sistemin çalışma süresince %5-40 aralığında tutulmuştur. Bu sayede sistemin daha güvenli çalışması amaçlanmıştır. Yapılmak istenen işlem için sürekli hal hatası referans alınarak amaç fonksiyonu değerinin minimizasyonu gerçekleştirilmeye çalışılmış ve elde edilen sonuçlar seçilen diğer 3 algoritma ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi için GKO, ABO ve PSO yöntemleri seçilmiştir. Karşılaştırma sırasında tüm algoritmaların eşit koşullarda kıyaslanabilmesi amacı ile bahsedilen geliştirme işlemi seçilen tüm algoritmalara uygulanmıştır. GKTO algoritmasından elde edilen sonuçlar; geliştirilmiş gri kurt optimizasyon (GGKO), geliştirilmiş ateş böceği (GABO) ve geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyon (GPSO) algoritmaları ile iterasyon sayısı, program çalışma süresi ve uygunluk değeri bakımından karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma işlemlerinde GPSO yöntemi daha az iterasyon sayısı ile optimum değere ulaşırken, çalışma süresi göz önünde bulundurulduğunda ise GGKO yönteminin daha kısa sürede optimum değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın devamında 2. bölüm alçaltıcı tip da-da dönüştürücüye ayrılmıştır. 3.bölümde kullanılan yöntemlerinden bahsedilmiştir. 4. ve 5. bölümde sırasıyla benzetim çalışmaları, bulgular ve tartışma verilmiştir. 6. bölümde ise sonuçlara yer verilmiştir.

2. Alçaltıcı Tip Da-Da Dönüştürücü

Endüstride sık kullanıma sahip BC devresi; girişine uygulanan gerilimi çıkışına düşürerek ileten bir dönüştürücü devresidir. BC devresi çalışma süresi boyunca anahtarın iletimde ve kesimde olma durumuna göre iki farklı şekilde çalışmaktadır. Ayrıca BC devresi sürekli ve süreksiz akım olmak üzere iki farklı çalışma dinamiğine sahiptir (Yaylacı

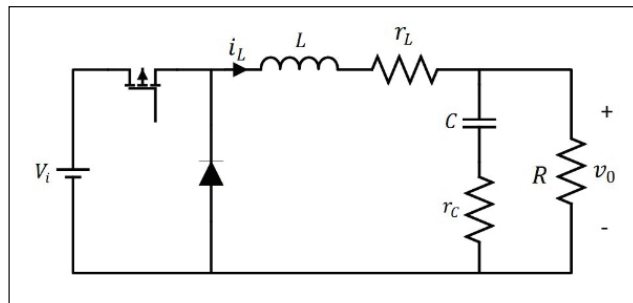
Çizelge 1. Optimizasyon yöntemleri ile ilgili literatür çalışmaları detaylı incelenmesi

(Izci vd. 2022)	Alçaltıcı tip dönüştürücü devresinin çıkış voltaj regülasyonu için optimal bir PID denetleyici tasarlamak amacıyla yapay ekosistem tabanlı optimizasyon (YEO) yöntemi ile Nelder Mead (NM) yönteminden oluşturulmuş hibrit bir algoritma (YEONM) kullanılmıştır.
(Izci ve Ekinci 2022)	Alçaltıcı tip dönüştürücü sisteminin optimum performansını elde etmek için, bir kesirli dereceli orantılı integral-türev (FOPID) denetleyicisi kullanılmış ve açıklık oyunları arama (AOA) algoritması geliştirilerek kullanılmıştır.
(Ravikumar vd. 2020).	Toplam harmonik bozulmanın azaltılması hedeflenen çalışmada hibrit bir güç sistemi önerilmiş ve sisteme da-da dönüştürücü devreleri uygulanarak analiz edilmiştir. Yapılan analizde harmonik bozulmasının azaltılması için kullanılan PI denetleyicinin katsayıları Fitness Odaklı Sürücü Optimizasyon algoritması ile optimize edilmiştir.
(Alremali vd. 2022)	Şebekeye bağlı güç üretim sisteminin güç kalitesini iyileştirmek için PI denetleyici kullanılan çalışmada GKO ile yapay sinir ağının bir kombinasyonu kullanılmıştır.
(Bayancık 2020)	Geçici hal kararlılık kısıtlı çok amaçlı optimal güç akışı probleminin çözümünde GKO yöntemi kullanılmıştır.
(Koç vd. 2018)	Çok seviyeli imge eşik seçiminde GKO algoritması kullanılmıştır.
(Azizuddin vd. 2019)	Paralel da-da dönüştürücü için optimum denetleyici tasarlamak amacıyla GKO algoritması kullanılmıştır.
(Doğan 2018)	Robot yol planlaması için GKO algoritması kullanılmıştır.
(Doğan 2019)	GKO ve Balina optimizasyon algoritmaları kullanılarak hibrit bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir.
(Hekimoğlu vd. 2018)	BC devresinin çıkış gerilim kontrolü amacı ile kullanılan PID denetleyicinin katsayılarının belirlenmesi için balina optimizasyon algoritması kullanılmış ve denetleyici sisteme uygulanmıştır.
(Boz ve Çimen 2017)	ABO algoritmasında geliştirme yapılarak birinci dereceden ve ikinci dereceden ölü zamanlı sistemler için PID denetleyici tasarımı yapılmıştır.
(Shagor vd. 2021)	ABO algoritması kullanılarak optimize edilmiş PID denetleyicisi tek uçlu birincil indüktör dönüştürücü (Single- Ended Primary Inductor Converter, SEPIC) devresinin geri besleme döngüsüne uygulanmıştır.
(Pamuk 2016)	Güç santralleri etkisindeki ekonomik yük dağıtım problemlerinin çözümünde kaotik ABO algoritması tercih edilmiştir.
(Berber vd. 2016)	Mobil robotlarda global yol planlaması için PSO yöntemi tercih edilmiştir.
(Dagal vd. 2022)	Kısmi gölgeleme koşulları altında otonom akü şarj sistemlerinin maksimum güç noktasını izlemek için yeni bir hibrit seri salp parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanılmıştır.
(Albak vd. 2022)	Dairesel çok hücreli çarpışma kutusunun optimizasyonu için PSO yöntemi kullanılmıştır.
(Tamer vd. 2021)	PI katsayılarında optimizasyon yöntemlerine başvuru çalışmada şönt aktif güç filtresinin DA bara voltaj kontrolü için PI denetleyici katsayılarının belirlenmesinde PSO yöntemine başvurulmuştur.
(Huo vd. 2022)	Hibrit bir sistemde verimliliği arttırmak amacı ile KTO tabanlı Kaos Kızıl Tilki Optimizasyon algoritması kullanılmıştır.

Çizelge 1. Devam

(Yousri vd. 2022)	PV hücrelerinde kullanılması planlanan tek ve çift diyot model parametrelerinin güvenilirliğinin artırılması amacı ile Runge Kutta yöntemi ile KTO algoritması ve beraberinde dört algoritmanın karşılaştırması yapılmıştır.
(Fu vd. 2022)	Deri kanserinin teşhisinde KTO algoritması geliştirilerek kullanılmıştır.
(Zhu vd. 2021)	Optimum model için Gri Çok Düzeyli Tam Değerlendirme yaklaşımının entegrasyonu ve çok kriterli optimizasyon için KTO yöntemini kullanmışlardır.
(Zhang vd. 2021)	KTO algoritması tabanlı geliştirilmiş algoritma ile olağanüstü öğrenme makineleri yöntemi hibrit bir şekilde kullanılmıştır.
(Połap ve Woźniak 2021a)	Yapay zeka çalışmalarında kullanılan birleşik öğrenme yönteminin doğruluğunu optimum düzeye çıkarmak için KTO algoritmasına başvurulmuştur.

vd. 2022). Bu çalışmada BC devresi sürekli akım modunda kullanılmış olup anahtarlama elemanı olarak MOSFET tercih edilmiştir. BC eşdeğer devresi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Alçaltıcı tip da-da dönüştürücü eşdeğer devresi.

Anahtarlama elemanının kapalı veya açık olma durumuna göre çıkış gerilim ve akım değeri farklı iki şekilde hesaplanmaktadır. Anahtar açık konumda iken akım ve çıkış gerilim değerleri Denklem (1) ve (2) ile ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{v_o}{L} \quad (1)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{v_o}{R} \right) \quad (2)$$

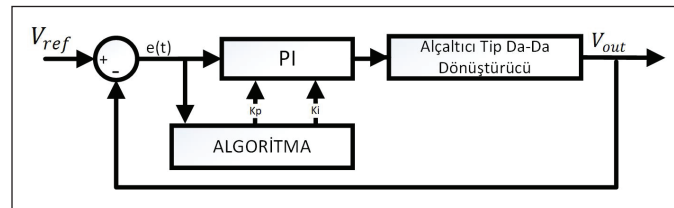
Anahtar kapalı konumda iken çıkış akım ve çıkış gerilim değerleri Denklem (3) ve (4) ile ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_i - v_o) \quad (3)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{v_o}{R} \right) \quad (4)$$

3. Çalışma İçin Kullanılan Yöntemler

Çalışmada kullanılan sistemin blok şeması Şekil 2 ile gösterilmiştir. Kontrol edilmek istenen değişken da-da dönüştürücünün çıkış gerilimidir. Ölçülen çıkış gerilimi, referans değer ile karşılaştırılıp hata sinyali elde edilir ve hata sinyali optimizasyon için algoritmaya gönderilir. Algoritma hata değerine göre denetleyici katsayılarını optimize eder.



Şekil 2. Sistem blok şeması.

Çalışma kapsamında beş farklı meta-sezgisel yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerden Ateş böceği optimizasyon (ABO), Gri kurt optimizasyon (GKO) ve Parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritmaları için özet bilgiler sunulmuştur. Çalışmanın odak noktası olan Kızıl tilki optimizasyon (KTO) ve Geliştirilmiş kızıl tilki optimizasyon (GKTO) algoritmaları için detaylı bilgi sunulmuştur. Kullanılan yöntemler aşağıda alt başlıklar ile sunulmuştur.

3.1. Ateş Böceği Optimizasyon Yöntemi

Ateş böceklerinin davranışlarını ve yanıp sönmeye (flaş) modellerini rehber alan ateş böceği algoritması ilk kez 2008 yılında Xin-She Yang tarafından geliştirilmiştir. Ateş böcekleri, karşı cinsin ilgisini çekmek veya avı kendine yaklaştırmak gibi amaçlarla flaş hareketlerini gerçekleştirmektedir. Ateş Böceği algoritmasına ilişkin daha detaylı bilgi için benzer çalışmalara bakılabilir (Yang 2014, Boz ve Çimen 2017).

3.2. Gri Kurt Optimizasyon Yöntemi

Gri kurt optimizasyon (GKO) algoritması besin zincirinin en üst tabakasında yer alan gri kurtların avlanma düzenini ve sosyal hiyerarşik yapısını konu almaktadır. Gri kurtlar kendi içerisinde sosyal hiyerarşi olarak alfa, beta, delta ve omega olarak sınıflandırılırlar. Gri Kurt algoritmasına ilişkin daha detaylı bilgi için benzer çalışmalara bakılabilir (Mirjalili 2014, Koç vd. 2018, Doğan 2019, Alremali vd. 2022).

3.3. Parçacık Sürü Optimizasyon Yöntemi

1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilen parçacık sürü optimizasyon algoritması, kuş ve böcek gibi sürü halinde hareket eden hayvanların yaşamsal döngü süresince birbirleri arasında gerçekleştirdikleri sosyal etkileşimden esinlenen bir optimizasyon algoritmasıdır (Gözde vd. 2010). Sürü zekasını, sürüdeki bireylerin yaşamsal faaliyetlerini sürdürmek için sergiledikleri rastgele davranışların etkilerini ve sürü içindeki sosyal dayanışmayı konu alır (Koç vd. 2018). PSO algoritmasına ilişkin daha detaylı bilgi için yazarlara ait diğer çalışmaya bakılabilir (Yaylacı vd. 2022).

3.4. Kızıl Tilki Optimizasyon Yöntemi

Kızıl tilki optimizasyon (KTO) algoritması 2021 yılında geliştirilmiş bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Kızıl tilkilerin avlanma ve yaşam biçimleri örnek alınarak geliştirilmiştir. Her sürü bir alfa çifti önderliğinde ayrı bölgelerde yer almaktadırlar. Kızıl tilkiler yaşadıkları bölgede yemek araması yapmaktadırlar. Bu arama esnasında tilkinin avlayabileceği bir av bulması halinde tilki etkili bir saldırı gerçekleştirebilmek için avına olabildiğince yaklaşmaktadır. Bahsedilen avlanma iki aşamada gerçekleşmektedir; ilk aşamada kızıl tilkiler buldukları bölge üzerinde av araması gerçekleştirirler. Bu arama aşamasına global arama ismi verilmektedir. Bölgede bir avın fark edilmesi ile sonlanmakta ve lokal arama olarak adlandırılan ikinci aşamaya geçilmektedir. İkinci avlanma aşamasında tilki avlamak üzere olduğu ava kendisini fark ettirmeden olabildiğince yaklaşmaktadır (Połap ve Woźniak 2021b).

Algoritmanın çalışma süresi boyunca başlangıçta belirlenen tilki sayısı değişmemektedir. n koordinatlarında bulunan her bir tilki $\bar{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ şeklinde ifade edilmekte ve $(\bar{x}^i)^t$ şeklinde gösterilmektedir. Burada i tilki sayısını, j boyut indisini, t iterasyon sayısını ifade etmektedir. Algoritmanın çalışma süresi boyunca amaç fonksiyonundan optimum değerleri bulmak için tilkilerin arama uzayı sınırları içerisinde av araması ve avlanma eylemlerini gerçekleştirdikleri varsayılmaktadır (Połap ve Woźniak 2021b).

3.4.1. Yemek Arama (Global Arama)

Sürünün hayatta kalabilmesi ve avlanabilmesi için tüm tilkiler önemli bir rol oynar. Bu sebeple tilkiler mevcut habitatlarında yemek bulamadıklarında uzak noktalara giderek av arayışı içine girmektedirler. Bu arayış sırasında edindikleri bilgi ve tecrübeleri sürüdeki diğer bireyler ile paylaşarak sürünün gelişmesi ve hayatta kalmasına fayda sağlamaktadırlar. Bölge, sürüdeki tüm tilkilerin uygunluk değerine göre modellenir ve sürüdeki en uygun değere sahip tilkinin arazi-deki en iyi noktada olduğu varsayılır. Daha sonra en iyi tilki bu noktayı sürüdeki diğer tilkiler ile paylaşır. Bölgenin keşfi ve avlanma işlemindeki bu ilerleyiş sebebiyle algoritmada belirlenen tilkiler, amaç fonksiyonuna göre sıralanır ve sürü içerisindeki en iyi tilki $(\bar{x}^{en\ iyi})^t$ ataması yapılır. Sonrasında sürüdeki her bir tilkinin $(\bar{x}^{en\ iyi})^t$ ile arasındaki öklid uzaklığı Denklem (17) ile ifade edildiği gibi hesaplanır. Yapılan hesaplama işlemi sonucunda sürüdeki tüm tilkiler Denklem (18) ile ifade edildiği gibi arama uzayı içerisinde yeniden konumlandırılır (Połap ve Woźniak 2021b).

$$d((\bar{x}^i)^t, (\bar{x}^{en\ iyi})^t) = \sqrt{\|(\bar{x}^i)^t - (\bar{x}^{en\ iyi})^t\|} \quad (17)$$

$$(\bar{x}^i)^t = (\bar{x}^i)^t + \alpha \cdot \text{sign}((\bar{x}^{en\ iyi})^t - (\bar{x}^i)^t) \quad (18)$$

Denklem (18) ile ifade edilen α değeri $(0, d((\bar{x}^i)^t, (\bar{x}^{en\ iyi})^t))$ aralığında tüm tilkiler için rastgele atanmaktadır. Yapılan yeniden konumlandırma işlemi sonrası tilkilerin her biri için bir önceki konum değerleri ile uygunluk değeri kıyaslaması yapılır. Yeni konum değerinin uygunluk değeri, bir öncekinden daha iyi ise konum değeri güncellenir. Aksi taktirde eski konum değeri korunur (Połap ve Woźniak 2021b).

3.4.2. Mevcut Habitattan Geçiş (Lokal Arama)

Kızıl tilki arama yaptığı arazi üzerinde av tayin ettiğinde, avını dairesel bir şekilde çevrelemeye başlar ve yaklaşabildiği kadar yakınına yaklaşır. Bu dairesel çevreleme sonucunda avına yeterince yaklaştığında ava saldırır. Bu yaklaşımın matematiksel modellemesinde μ parametresi kullanılır. Bu parametre her iterasyonda 0 ile 1 aralığında rastgele atanmakta ve güncellenmektedir (Połap ve Woźniak 2021b).

$$\begin{cases} \text{Ava yaklaş} & \mu > 0.75 \\ \text{Konumunu koru ve saklan} & \mu \leq 0.75 \end{cases} \quad (19)$$

Yukarıdaki denklem ile belirtildiği gibi μ parametresinin 0.75'ten büyük gelmesi halinde tilki ava yaklaşmaya devam etmektedir. Aksi halde tilki konumunu korumaktadır. Tilkinin harekete geçmesi halinde hareketin matematiksel modellenmesi amacıyla gözlem yarı çapı a ve ϕ_0 paramet-

releri ile temsil edilmektedir. Burada a , 0 ile 0.2 aralığında her iterasyonda tüm tilkiler için güncellenen, ölçeklendirme amacı ile kullanılan bir parametredir. ϕ_o ise 0 ile 360 derece aralığında tilkilerin gözlem açısını temsil eden, başlangıçta tüm tilkiler için rastgele atanan bir parametredir. Tilkinin ava yaklaşmasında sergilediği çevreleme hareketinin modellenmesinde değiştirilmiş Cochleoid denklemi kullanılmaktadır. Tilkinin gözlem yarıçapı Denklem (20) ile ifade edildiği gibi tanımlanmaktadır (Połap ve Woźniak 2021b).

$$r = \begin{cases} a \frac{\sin(\phi_o)}{\phi_o} & \text{eğer } \phi_o \neq 0 \\ \theta & \text{eğer } \phi_o = 0 \end{cases} \quad (20)$$

Denklem (20)'de ifade edilen θ parametresi, tilkinin avlandığı ortamda avlanma kabiliyetini etkileyebilecek hava koşullarını (sis, yağmur, kar gibi) temsil etmekte ve 0 ile 1 aralığında başlangıçta rastgele atanmaktadır. Tilkilerin avı çevreleme hareketleri Denklem (21) ile gösterildiği gibi ifade edilmektedir (Połap ve Woźniak 2021b).

$$\begin{cases} x_0^{yeni} = ar \cdot \cos(\phi_1) + x_0^{gercek} \\ x_1^{yeni} = ar \cdot \sin(\phi_1) + ar \cdot \cos(\phi_2) + x_1^{gercek} \\ x_2^{yeni} = ar \cdot \sin(\phi_1) + ar \cdot \sin(\phi_2) + ar \cdot \cos(\phi_3) + x_2^{gercek} \\ \dots \\ x_{n-2}^{yeni} = ar \cdot \sum_{k=1}^{n-2} \sin(\phi_k) + ar \cdot \cos(\phi_{n-1}) + x_{n-2}^{gercek} \\ x_{n-1}^{yeni} = ar \cdot \sin(\phi_1) + ar \cdot \sin(\phi_2) + \dots + ar \cdot \sin(\phi_{n-1}) + x_{n-1}^{gercek} \end{cases} \quad (21)$$

Denklem (21) ile ifade edilen $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{n-1}$ değerleri 0 ile 2π aralığında her tilki için rastgele atanmaktadır. Tilkinin avına yaklaşımı sırasında, avın kendisinin fark etmesi halinde tilki kendisine başka bir av seçerek aynı yaklaşım ile ona yaklaşır. Bahsedilen yaklaşım lokal arama aşaması için ifade edilmiştir (Połap ve Woźniak 2021b).

3.4.3. Sürüden Ayrılma ve Sürüye Katılma

Kızıl tilkiler yaşamları boyunca yaşam alanlarında yemek bulamama ve insanlar tarafından avlanma gibi tehlikeler ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu tehlikeler sonucunda tilkiler buldukları alanları terk etmek zorunda kalmakta ve sayıları azalmaktadır. Fakat sürü içerisindeki zeki tilkiler bu olumsuz şartlardan etkilenmeyerek kendilerine yiyecek bulmakta ve avcılardan kaçarak yeni yaşam alanı kurmak için zemin hazırlayabilmektedirler. Bu olumsuz koşullar sebebiyle sürüdeki tilki sayısında gerçekleşen değişimi algoritmada belirtmek amacıyla her iterasyon sonucunda amaç fonksiyonu uygunluk değerine bakılarak sürüdeki en kötü tilkilerin %5'i belirlenmektedir. Belirlenen bu tilkile-

rin olumsuz koşullar sebebiyle sürüden ayrıldığı varsayılır. Bu durum sürüdeki sayının azalmasına sebep olmaktadır. Bu olumsuz etkiyi gidermek ve sürüdeki tilki sayısını sabit tutmak amacı ile yaşam alanına yeni tilkiler eklenmektedir. Belirtilen işlemin gerçekleştirilmesi için her iterasyonda $(\bar{x}^{(1)})^t$ ve $(\bar{x}^{(2)})^t$ şeklinde belirtilen sürünün en iyi iki tilkisi belirlenir ve alfa çifti olarak kabul edilir. Belirlenen alfa çifti yardımı ile Denklem (22) ile ifade edildiği gibi habitatın merkezi hesaplanmaktadır (Połap ve Woźniak 2021b).

$$(\text{habitat}^{(merkez)})^t = \frac{(\bar{x}^{(1)})^t + (\bar{x}^{(2)})^t}{2} \quad (22)$$

Sonrasında alfa çiftinin kendi aralarındaki Öklid uzaklığı hesaplanarak habitatın çapı Denklem (23) ile ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır (Połap ve Woźniak 2021b).

$$(\text{habitat}^{(cap)})^t = \sqrt{\|(\bar{x}^{(1)})^t - (\bar{x}^{(2)})^t\|} \quad (23)$$

Her iterasyonda $\langle 0,1 \rangle$ aralığında bir κ parametresi belirlenir ve sürüye yeni katılacak olan tilkilerin katılım şekilleri belirlenmektedir. Belirtilen yöntem Denklem (24) ile ifade edildiği gibi gerçekleştirilmektedir (Połap ve Woźniak 2021b).

$$\begin{cases} \text{Yeni göçebe tilkiler} & \text{eğer } \kappa \geq 0.45 \\ \text{Alfa çiftinin üremesi} & \text{eğer } \kappa < 0.45 \end{cases} \quad (24)$$

κ parametresinin 0.45'e eşit veya büyük olması durumunda sürüye yeni eklenecek olan tilkiler sürünün dışı ile arama uzayının sınırları arasından rastgele sürüye dahil edilmektedir. κ parametresinin 0.45'ten küçük gelmesi halinde yeni tilkiler alfa çiftinden meydana gelmektedir ve konumları Denklem (25) ile ifade edildiği gibi belirlenmektedir (Połap ve Woźniak 2021b).

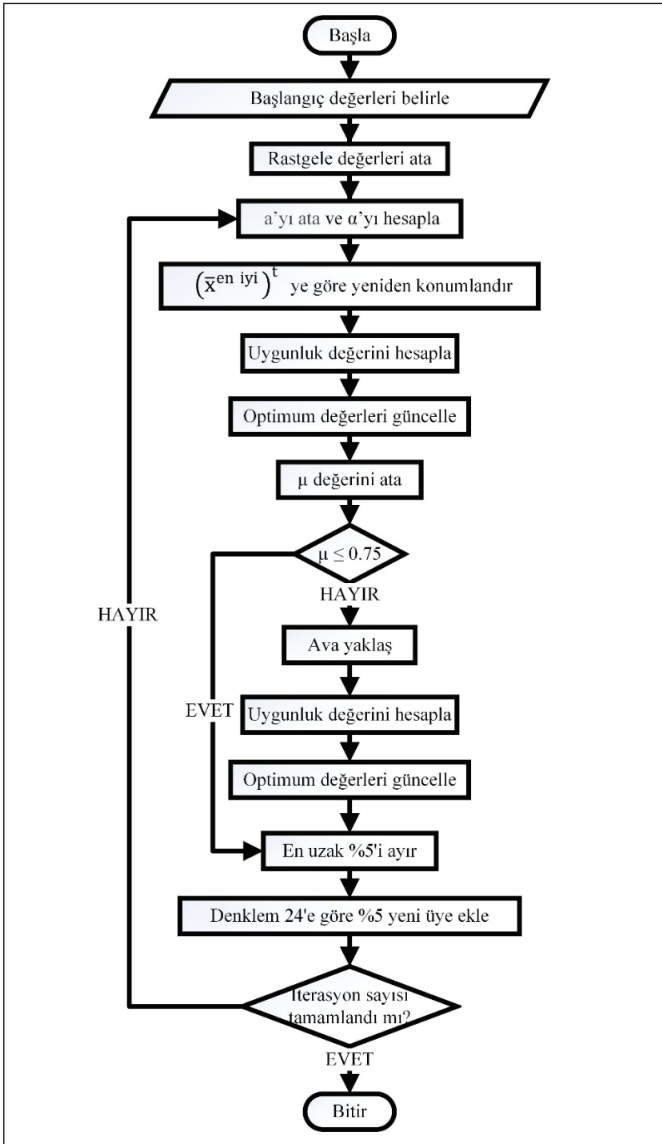
$$(\bar{x}^{(alfa\ çiftinden\ üreyen)})^t = \kappa \frac{(\bar{x}^{(1)})^t + (\bar{x}^{(2)})^t}{2} \quad (25)$$

KTO yönteminin akış şeması Şekil 3 ile sunulmuştur.

3.5. Geliştirilmiş Kızıl Tilki Optimizasyon Yöntemi

Literatürde incelenen optimizasyon çalışmalarının çoğunluğunda, algoritmanın başlangıcında belirlenmesi gereken iterasyon sayısının ve arama uzayı sınır değerlerinin, genellikle kullanıcının tecrübe ve bilgisine dayanılarak belirlendiği görülmektedir (Özsağlam ve Çunkaş 2008, Połap ve Woźniak 2021b, Uzlu 2009). Kızıl tilki algoritmasında da iterasyon sayısı ve arama uzayı sınırları, algoritmanın başlangıcında kullanıcı tarafından bir defaya mahsus belirlenmekte ve program sonuna kadar bu değerler değişmemektedir (Połap ve Woźniak 2021b).

Geliştirilen kızıl tilki algoritmasında başlangıçta iterasyon sayısı ve arama uzayının sınır değerleri minimum değerlerde seçilmektedir. Bununla birlikte amaç fonksiyonundan alınmak istenen uygunluk değeri için bir üst sınır değeri belirlenmektedir. Algoritmanın çalışması esnasında elde edilen konum değerinin arama uzayının sınırlarını aşması durumunda, sistemde oluşturdukları amaç fonksiyonu uygunluk değeri incelenmektedir. İncelenen bu değer $(\bar{x}^{en\ iyi})^t$ değerinden daha uygun bir değer gelmesi halinde arama uzayının sınırları bu değer ile güncellenmektedir. Aksi halde ise sınır aşan konum değeri için arama uzayı sınırları içerisinde rastgele değer ataması yapılmaktadır. Bu kontrol tüm iterasyonlar boyunca her konum güncellemesi olduğunda tekrarlanmaktadır.



Şekil 3. Kızıl tilki optimizasyon algoritması akış şeması.

Sınır güncelleme işleminin istenen iterasyon sayısının son evrelerinde gerçekleşmesi durumunda, yeni sınır aralıklarında detaylı arama yapılabilmesi için iterasyon sayısı artırılmakta ve iterasyona en baştan başlanmaktadır. Buna ek olarak uygunluk değeri başlangıçta belirlenen üst sınır değerinin altına gelene kadar arama uzayının sınırları ötelenmekte ve iterasyon sayısı artırılarak aramaya devam edilmektedir. Bu öteleme işlemi sırasında, yapılan aramanın detaylandırılabilmesi için arama uzayının alt ve üst sınırları arasındaki farkın, birey sayısını geçmemesi göz önünde bulundurulmaktadır. İterasyon sayısı sınır değişim işlemlerinin her birinde güncellenerek dinamik bir hale getirilmiştir. Dinamikleşen bu iterasyon sayısı kullanıcı bilgisine başvurmak yerine, optimum katsayı değerlerinin bulunabilmesi için gerekli olan iterasyon sayısının algoritma tarafından bulunmasını sağlamaktadır. Bunun yanında sistemde kullanılan malzemelerin zarar görmesini engellemek ve tasarım ölçütlerinin aşılması amacıyla maksimum aşım değeri dikkate alınarak algoritma geliştirilmiştir.

4. Benzetim Çalışmaları

Bu çalışma kapsamında kullanılan BC devresinin parametre değerleri Çizelge 2'de ifade edildiği gibidir.

Çizelge 2. Parametre değerleri.

Tanım	Sembol	Parametre
Giriş Gerilimi	V_s	9 V
Çıkış Gerilimi	v_0	5 V
İndüktör	L	200 μ H
Kapasitör	C	370 μ F
Yük Direnci	R	10 Ω
İndüktör parazitik direnci	r_L	0.2 Ω
Kondansatör eşdeğer direnci	r_c	50 m Ω
Anahtarlama Frekansı	f_s	20 kHz

KTO algoritmasında yapılan geliştirme işlemi GKO, PSO ve ABO algoritmalarında da gerçekleştirilmiş ve 4 yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sırasında maksimum aşım değeri, yerleşme zamanı, iterasyon sayısı ve sistemlerin çalışma süreleri göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan optimizasyon yöntemlerinde amaç fonksiyonu olarak Denklem (26) ile ifade edilen hataların mutlak değerleri toplamı (HMT), Denklem (27) ile ifade edilen hataların kareleri toplamı (HKT) ve Denklem (28) ile ifade edilen zamanla ağırlıklandırılmış hataların kareleri toplamı

(ZHKT) ifadelerinin Denklem (29) ile belirtildiği gibi ortalaması alınarak kullanılmıştır. Tüm çalışmalar neticesinde elde edilen optimum denetleyici katsayıları Çizelge 3 ile sunulmuştur.

$$HMT = \sum_{k=1}^q |e(k)| \quad (26)$$

$$HKT = \sum_{k=1}^q e^2(k) \quad (27)$$

$$ZHKT = \sum_{k=1}^q t.e^2(k) \quad (28)$$

$$\text{Amaç fonksiyonu} = \frac{HMT + HKT + ZHKT}{3} \quad (29)$$

Çizelge 3. Optimum K_p ve K_i değerleri.

Yöntemler	K_p	K_i
GKTO	0.063	334.884
GGKO	0.736	341.820
GPSO	0.598	341.701
GABO	0.719	342.010

5. Bulgular ve Tartışma

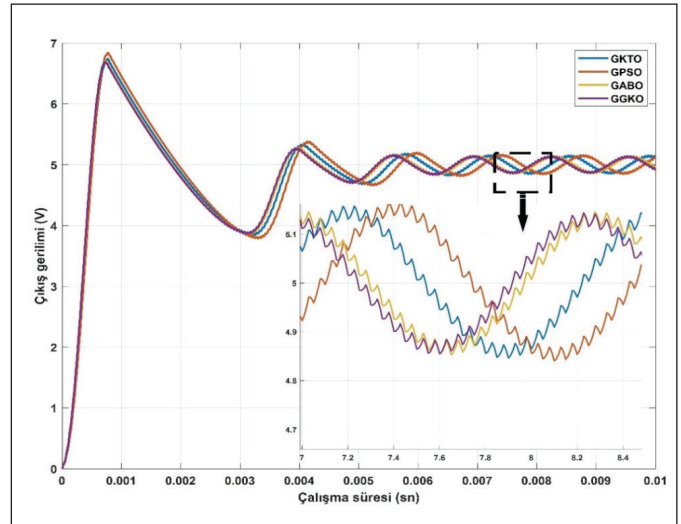
Bahsedilen algoritmaların çalışma süreleri ve iterasyon sayıları Çizelge 4 ile belirtildiği gibidir.

Çizelge 4. İterasyon sayısı ve çalışma süreleri.

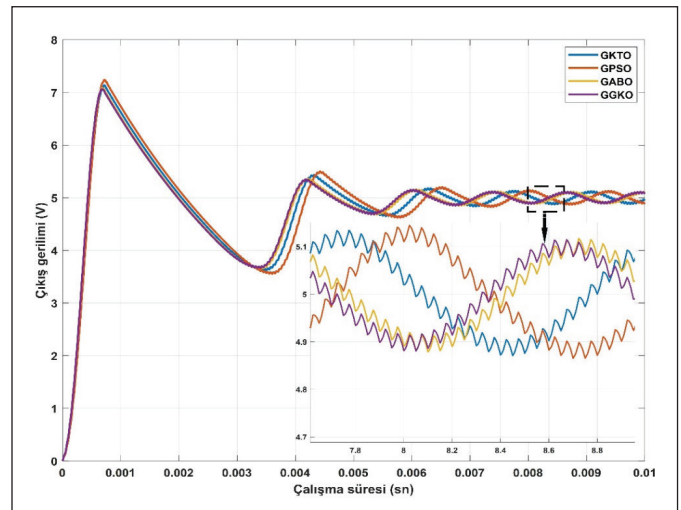
	İterasyon Sayısı	Çalışma Süresi
GKTO	300	37453 sn
GPSO	164	31041 sn
GABO	300	254866 sn
GGKO	234	22053 sn

İterasyon sayısı bakımından GPSO en az iterasyon ile optimum katsayıları elde etmesine rağmen GGKO algoritması en kısa sürede optimum değerleri elde etmiştir. Yapılan karşılaştırma işlemleri sırasında yerleşme zamanı için %5 kriteri göz önünde bulundurulmuştur. Sistemin normal koşullarda çalışması sonucunda elde edilen değerler Şekil 4 ile verilmiştir.

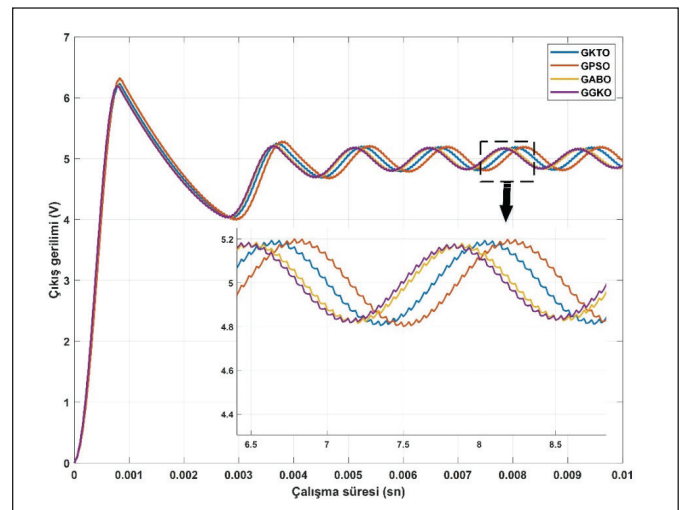
Bulunan optimum değerlerin farklı koşullar altında sistemde oluşturdukları değerlerin incelenebilmesi için yük direnci, çıkış gerilimi ve giriş gerilim değerleri $\pm\%20$ değiştirilerek sistem üzerinde test edilmiştir. Giriş geriliminin $\pm\%20$ değişimi sonucunda sistemin çıkış gerilim grafiği Şekil 5 ve 6 ile verilmiş, elde edilen değerlerin detaylı incelenebilmesi için tablolaştırılarak Çizelge 5 ile ifade edilmiştir. Burada M_p maksimum aşımı, t_s ise yerleşme zamanını ifade etmektedir.



Şekil 4. Normal koşullar altında denetleyici performansları.



Şekil 5. Giriş gerilimi 10.8 V iken denetleyici performansları.



Şekil 6. Giriş gerilimi 7.2 V iken denetleyici performansları.

Bir diğer karşılaştırma işleminde ise giriş gerilimi 9V'ta sabit tutularak çıkış gerilim referansında $\pm\%20$ değişim uygulanmıştır. Çıkış referans değeri 6 ve 4V iken sistemin çıkış gerilim grafiği Şekil 7 ve 8 ile belirtilmiştir.

Elde edilen sonuçlar bir önceki karşılaştırma işleminde olduğu gibi detaylı inceleme sunulabilmesi için tablolaştırılmış ve Çizelge 6 ile ifade edilmiştir.

Son çalışmada ise giriş gerilimi 9V'ta sabit tutularak yük direncinde $\pm\%20$ değişim yapılarak sistemin çıkış gerilim grafiği incelenmiş, Şekil 9 ve 10 ile belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 7 ile ifade edildiği gibidir. Yapılan test çalışmalarının sonuçları incelendiğinde, elde edilen sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 5. $\pm\%20$ giriş gerilimi değişimi.

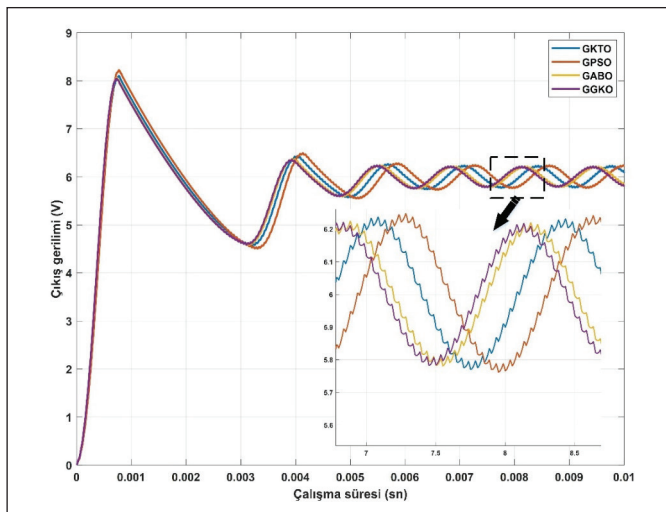
Giriş gerilimi	GKTO		GPSO		GABO		GGKO	
	M_p (%)	t_s (ms)	M_p (%)	t_s (ms)	M_p (%)	t_s (ms)	M_p (%)	t_s (ms)
9 V	34.84	5.257	36.80	5.423	34.10	5.065	35.80	5.018
10.8 V	42.74	5.799	44.78	6.014	41.60	5.521	41.28	5.469
7.2 V	24.60	4.677	26.38	4.821	24.18	4.573	23.94	4.531

Çizelge 6. $\pm\%20$ çıkış gerilim referans değişimi.

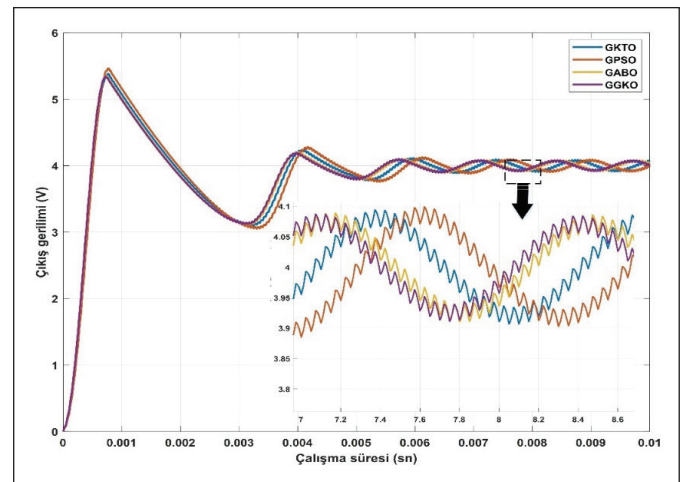
Çıkış Gerilimi	GKTO		GPSO		GABO		GGKO	
	M_p (%)	t_s (ms)	M_p (%)	t_s (ms)	M_p (%)	t_s (ms)	M_p (%)	t_s (ms)
5 V	34.84	5.257	36.80	5.423	34.10	5.065	35.80	5.018
6 V	35.03	5.174	37.00	5.357	34.38	5.021	34.08	4.971
4 V	34.65	5.288	36.60	5.544	33.85	4.959	33.52	5.059

Çizelge 7. Yük direnci değeri $\pm\%20$.

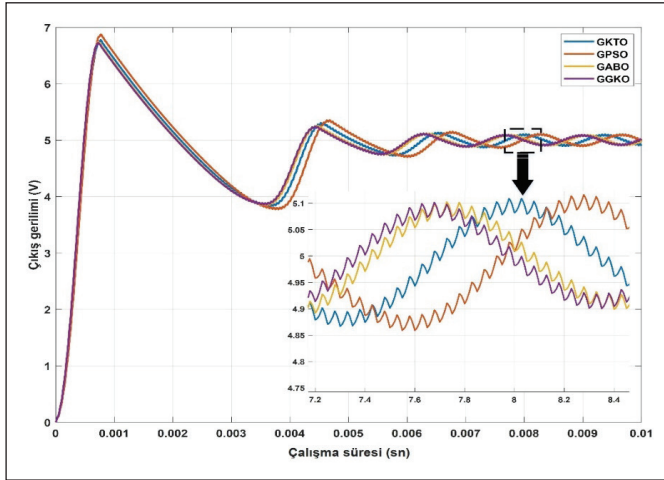
R (Ω)	GKTO		GPSO		GABO		GGKO	
	M_p (%)	t_s (ms)	M_p (%)	t_s (ms)	M_p (%)	t_s (ms)	M_p (%)	t_s (ms)
10	34.8	5.257	36.80	5.423	34.10	5.065	35.80	5.018
12	35.5	5.871	37.52	6.133	34.82	5.617	34.52	5.513
8	33.8	4.620	35.74	5.963	33.06	4.472	32.78	4.452



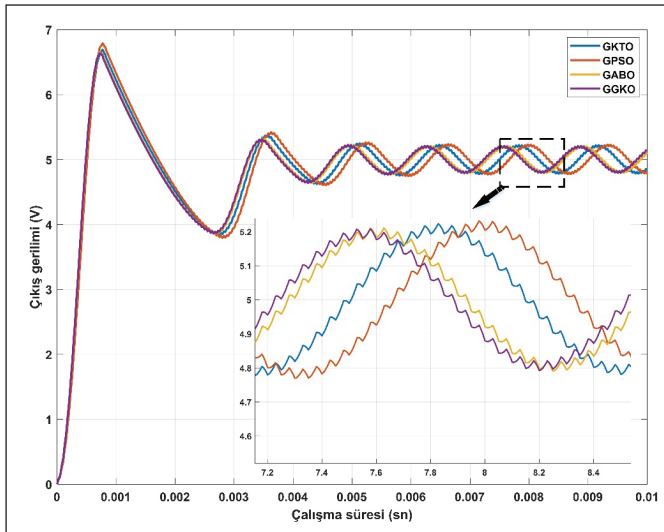
Şekil 7. Çıkış gerilimi 6 V iken denetleyici performansları.



Şekil 8. Çıkış gerilimi 4 V iken denetleyici performansları.



Şekil 9. Yük direnci 12 Ω iken denetleyici performansları.



Şekil 10. Yük direnci 8 Ω iken denetleyici performansları.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada BC devresinin çıkış gerilim kontrolü için uygulanan PI denetleyicinin optimum katsayılarının elde edilmesi amacıyla KTO algoritması geliştirilerek sisteme uygulanmıştır. Bununla birlikte yaygın kullanıma sahip diğer meta-sezgisel algoritmalar olan GKO, ABO ve PSO algoritmalarına da aynı geliştirme işlemi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak kullanılan yöntemlerin kontrol performansını kıyaslamak amacıyla giriş gerilimi, çıkış gerilimi referans değeri ve yük direnci üzerinde $\pm\%20$ değişiklik uygulanarak sonuçlar gözlemlenmiştir. Yapılan karşılaştırma işlemi sonucunda denetleyici performanslarının birbirlerine oldukça yakın performans gösterdikleri gözlemlenmiştir. Algoritmaların çalışma süreleri kıyaslandı-

ğında ise GGKO algoritmasının optimum sonuçlara daha hızlı ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca algoritmalarda yapılan geliştirme işleminin optimum değerlerin bulunması amacıyla tekrarlanması gereken iterasyon sayısının belirlenmesinde kullanıcıya kolaylık sağladığı görülmektedir.

7. Kaynaklar

- Albak, E.İ., Solmaz, E. & Öztürk, F. 2022. Çoklu arama stratejileri kullanan çok amaçlı parçacık sürü optimizasyon yöntemi ile dairesel çok hücreli çarpışma kutusunun optimizasyonu. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 27(1), 119–134.
- Alremali, F., Yaylacı, E. & Uluer, İ. 2022. Optimization of proportional-integral controllers of grid-connected wind energy conversion system using grey wolf optimizer based on artificial neural network for power quality improvement. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(3), 295–305.
- Azizuddin, M., Khalil, A., Yunus, S., Petra, R. Jaafar, S., Peng, A.S. & Khan, S. 2019. Optimum controller design of parallel Dc/Dc converters using grey wolf optimization algorithm. *6th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences*, December, 1–6.
- Bayancık, R. 2020. Gri Kurt Algoritması Kullanılarak Geçici Hal Kararlılık Kısıtlı Çok Amaçlı Optimal Güç Akışı Çözümü. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Berber, Ö., Ateş, M., Alruim Alhasan, H. & Güneş, M. 2016. Parçacık Sürü Optimizasyonu ve PID ile Mobil Robotun Optimum Yörünge Kontrolü. *KSU. Journal of Engineering Sciences*, 19(3), 165–169.
- Boz, A.F. & Çimen, M.E. 2017. Geliştirilmiş Ateşböceği Algoritması ile PID Denetleyici Tasarımı. *8th International Advanced Technologies Symposium*, December, 3358–3365.
- Dagal, I., Akın, B. & Akboy, E. 2022. A novel hybrid series salp particle Swarm optimization (SSPSO) for standalone battery charging applications. *Ain Shams Engineers Journal*, 13(5), 101747.
- Doğan, C. 2019. Balina Optimizasyon Algoritması ve Gri Kurt Optimizasyonu Algoritmaları Kullanılarak Yeni Hibrit Optimizasyon Algoritmalarının Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Doğan, L. 2018. Robot Yol Planlaması İçin Gri Kurt Optimizasyon Algoritması. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Fu, Z., An, J., Yang, Q., Yuan, H., Sun, Y. & Ebrahimian, H. 2022. Skin cancer detection using Kernel Fuzzy C-means and Developed Red Fox Optimization algorithm. *Biomedical Signal Processing and Control*, 71.

- Gözde, H., Taplamacıoğlu, M.C., Kocaarslan, İ. & Şenol, M.A. 2010.** İki bölge ara-ısıtmalı termal güç sisteminin yüksek frekans kontrolü için parçacık sürüsü optimizasyonu tabanlı PI-kontrolör. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30(1), 13–21.
- Hekimoğlu, B., Ekinci, S. & Kaya, S. 2018.** Optimal PID Controller Design of DC-DC Buck Converter using Whale Optimization Algorithm, *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, pp. 1–6.
- Huo, Z., Liu, S.J. & Ebrahimian, H. 2022.** Aircraft energy management system using chaos red fox optimization algorithm. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 17(1), 179–195.
- Izci, D., Ekinci, S. 2022.** A novel improved version of hunger games search algorithm for function optimization and efficient controller design of buck converter system. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy 2*.
- Izci, D., Hekimoğlu, B., Ekinci, S. 2022.** A new artificial ecosystem-based optimization integrated with Nelder-Mead method for PID controller design of buck converter. *Alexandria Engineering Journal*, 61(3), 2030–2044.
- Koc, I., Baykan, O.K. & Babaoglu, I. 2018.** Gri kurt optimizasyon algoritmasına dayanan çok seviyeli imge eşik seçimi. *Journal of Polytechnic*, 21(4), 841–847.
- Madhu Kiran, E.R.C.S., Thota, P.S., Sridhar, B. & Dileesh, K. 2012.** Control of Buck Converter by Polynomial, PID and PD Controllers. *2012 Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics*, 5-7 Aralık, 94–99.
- Mirjalili, S. 2014.** Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61.
- Murdianto, F.D., Nansur, A.R., Hermawan, A.S.L., Purwanto, E., Jaya, A. & Rifadil, M.M. 2018.** Modeling and Simulation of MPPT SEPIC - BUCK Converter Series Using Flower Pollination Algorithm (FPA) - PI Controller in DC Microgrid Isolated System, *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, pp.1–4.
- Özsağlam, M.Y. & Çunkaş, M. 2008.** Optimizasyon problemlerinin çözümü için parçacık sürü optimizasyonu algoritması. *Journal of Polytechnic*, 11(4), 299–305.
- Pamuk, N. 2016.** Kaotik ateşböceği optimizasyon algoritması kullanarak termik güç santralleri etkisindeki ekonomik yük dağıtım problemlerinin çözümü. *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 2, 38–59.
- Penbegüllü, İ. 2019.** Düşürücü Tip Dc-Dc Dönüştürücünün Optimize Edilmiş PID Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Polap, D. & Woźniak, M. 2021a.** Meta-Heuristic as manager in federated learning approaches for image processing purposes. *Applied Soft Computing*, 113.
- Polap, D. & Woźniak, M. 2021b.** Red fox optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 166.
- Ravikumar, S., Vennila, H. & Deepak R. 2020.** Hybrid power generation system with Total Harmonic Distortion minimization using improved Rider Optimization Algorithm: Analysis on converters. *Journal of Power Sources*, 459, 228025.
- Shagor, M.R.K., Mahmud, A.J., Nishat, M.M., Faisal, F., Mithun, M.H. & Khan, M.A. 2021.** Firefly Algorithm Based Optimized PID Controller for Stability Analysis of DC-DC SEPIC Converter. *2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference*, 1-4 December, pp. 957–963.
- Tamer, A., Zellouma, L., Benchouia, M.T. & Krama, A. 2021.** Adaptive linear neuron control of three-phase shunt active power filter with anti-windup PI controller optimized by particle swarm optimization. *Computers and Electrical Engineering*, 96, 107471.
- Uzlu, E. 2019.** Türkiye için gri kurt optimizasyon algoritması ile yapay sinir ağlarını kullanarak enerji tüketiminin tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 245–262.
- Yang, X.S. 2014.** Nature-inspired optimization algorithms. *Elsevier*, London, pp.111–124.
- Yaylacı, E.K., Yılmaz, A.E. & Özdeş, H.N. 2022.** Geliştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması ile Da-Da Alçaltıcı Tip Dönüştürücünün PI Katsayılarının Optimizasyonu. *2nd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, 10-13 Mart, ss. 257–261.
- Yousri, D., Mudsh, M., Shaker Y.O., Abualigah, L., Tag-Eldin, E., Elaziz, M.A. & Allam, D. 2022.** Modified Interactive Algorithm Based on Runge Kutta Optimizer for Photovoltaic Modeling: Justification Under Partial Shading and Varied Temperature Conditions, *IEEE Access*, 10, 20793–20815.
- Zhang, M., Xu, Z., Lu, X., Liu, Y., Xiao, Q. & Taheri, B. 2021.** an optimal model identification for solid oxide fuel cell based on extreme learning machines optimized by improved red fox optimization algorithm. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 28270–28281.
- Zhu, N., Liu, X., Dong, Q. & Rodriguez, D. 2021.** Optimization of zero-energy building by multi-criteria optimization method: A case study. *Journal of Building Engineering*, 44, 1–13.



Fracture Morphology of Single-Lap Dissimilar Joints Between Thermoplastic Composite and AA5754-H111 with Laser Ablation Surface Pre-Treatment

Termoplastik Kompozit ve Lazer Uzaklaştırmalı Yüzey Ön İşlem Uygulanmış AA5754-H111 Arasındaki Bindirme Şeklinde Farklı Birleştirmelerin Kırılma Morfolojisi

Nahit Öztoprak* , Gökçe Mehmet Gençer 

Dokuz Eylül University, Department of Mechanical Engineering, İzmir, Türkiye

Abstract

Hot pressing is successfully proposed to bond metallic and polymeric materials as a direct-joining method to replace conventional assembly techniques. This article reports an experimental investigation on the failure mechanism analysis of single-lap joints (SLJs) subjected to tensile-shear loading. Al5754 alloy in H111 condition and long glass fiber reinforced-polypropylene (PP) composite are used as the adherends. In order to enhance the bond strength, laser processing is applied to the metal surface. A grid texture model by eight consecutive times scanning is utilized for the surface modification. After fabrication of the dissimilar joint, quasi-static mechanical performance of the metal-polymer hybrid structure is elucidated through tensile-shear testing. Thereafter, morphology of the fracture surfaces is evaluated by scanning electron microscopy (SEM). The experimental findings reveal that the laser surface texturing is proved to be an outstanding candidate for achieving strong joints through micro-interlocking in such metal/polymer multi-material connections. The ultimate force reaches the value of 1515.10 N after the 20 W laser surface pre-treatment.

Keywords: Single lap joints, Hot pressing, Laser ablation treatment, Fracture surface

Öz

Sıcak presleme geleneksel montaj tekniklerinin yerine doğrudan birleştirme yöntemi olarak metalik ve polimerik malzemeleri yapıştırmak için başarıyla önerilmektedir. Bu makale, çekme-kesme yüklemesine maruz kalan tek bindirmeli bağlantıların hasar mekanizması analizi üzerine deneysel bir araştırmayı bildirmektedir. Yapıştırılan malzemeler olarak H111 durumunda Al5754 alaşımı ve uzun cam elyaf takviyeli polipropilen (PP) kompozit kullanılmıştır. Bağlantı dayanımını arttırmak için metal yüzeye lazer işlemi uygulanmıştır. Yüzey modifikasyonu için art arda sekiz kez tarama ile bir ızgara doku modeli kullanılmıştır. Farklı bağlantının üretiminden sonra, metal-polimer hibrit yapının yarı statik mekanik performansı çekme-kesme testi ile açıklanmıştır. Sonrasında, kırılma yüzeylerinin morfolojisi taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular lazer ile işlenmiş yüzey dokusunun bu tür metal/polimer çoklu malzeme bağlantılarında mikro kenetleme yoluyla güçlü bağlantılar elde etmek için üstün bir aday olduğunun kanıtlandığını ortaya koymuştur. Nihai kuvvet 20 W lazer yüzey ön işleminde sonra 1515.10 N değerine ulaşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tek bindirmeli bağlantılar, Sıcak presleme, Lazer ile uzaklaştırma işlemi, Kırılma yüzeyi

1. Introduction

Competing demand of weight reduction results in a set of challenges for which the use of a combination of dissimilar parts can be a promising solution (Bilgin et al.

2019). Multi-material structures have emerged as a popular concept in order to benefit from the outstanding properties of different materials such as polymeric and metallic based materials (Dasilva et al. 2021). Dissimilar joints can lead to practical engineering solutions especially for automotive and aeronautical industries (Akpınar 2019). Compared with traditional connection methods such as mechanical fastening and welding, adhesion technology in the joining of adherends made of dissimilar materials has many advantages of cost effectiveness (Dantas et al. 2021), corrosion resistance (Gultekin 2022), design flexibility and ease of production

*Corresponding author: nahit.oztoprak@deu.edu.tr

Nahit Öztoprak  orcid.org/0000-0003-1132-8768

Gökçe Mehmet Gençer  orcid.org/0000-0003-1084-7240



(Huang et al. 2021). However, the joining through adhesive bonding process is facing significant drawbacks because of some adhesives that require heat curing (Agha and Abu-Farha 2021) and possible non-uniform stress distributions at the end of overlap area (Cetkin 2021). Therefore, direct bonding has received increasing attention in recent years due to especially its practicalness of time saving (Oztoprak 2021a). Hot-pressing joining can meet the growing requirements for adhesive-free adhesion without any additional components, and thus, has great potential with high-quality joints for its utilization in various engineering fields (Liu et al. 2021a, Oztoprak 2021b). Considering their convenience in fabrication and low cost (Kanani et al. 2020), single-lap joints (SLJs) are considered as the outstanding candidates for the bonding of dissimilar adherends. Undoubtedly, there is a need for particular modification to the metal surface in dissimilar joints in order to increase the bond strength. Here, laser ablation treatment can be more suitable for the modification of metal surface topography (Zhang et al. 2021). Laser processing offers environmental friendliness and repeatability as well as effectuality (Min et al. 2020).

Up to now, a large number of studies have focused on the laser pre-treatment of Al alloys. Most of the researches are dealing with the adhesive bonding (Akman et al. 2021, Schanz et al. 2021, Feng et al. 2021). However, only limited work exists on the mechanical performance of metal/polymer joints manufactured by hot-pressing. Therefore, there is a need to better understand the fracture mechanism of dissimilar joints through adhesiveless bonding. Liu et al. (2020) investigate the different microstructural morphologies on the lap joint shear strength of CFRP/AA7075 with laser surface processing. The joint fabrication is performed by hot-pressing process. They have found that the line pattern and square wave structures enhance the sudden fracture and increase the failure displacement by comparison with the untreated lap joint. Liu et al. (2021b) perform a comprehensive experimental study on the CFRP/Ti6Al4V hot-pressing joints of laser treatment with various textured grid widths. Their results indicate that the shear force first increases and then declines with the increase of grid width from 0.1 mm to 0.4 mm. Interface failure and cohesive failure are observed as the main damage mechanisms. In addition, in the research reported by Zhou et al. (2021), ultrasonic vibration assisted hot pressing method is utilized for the fabrication of carbon fiber/AZ31 Mg-based (CF/Mg-based) hybrid laminates bonded with Mg-Zn-Al eutectic alloy solder. Mechanical

properties and failure mechanism of the laminates are evaluated in their study. The laminates bonded through the solder exhibit a superior interlaminar fracture toughness by comparison with the laminates bonded with epoxy resin. Considering the brief literature review, the previous studies have only focused on examining the dissimilar joints with carbon fiber-reinforced polymers. However, fundamental research on the tensile-shear properties and failure modes of the SLJs between glass fiber-reinforced thermoplastic composites and non-heat treatable aluminum/magnesium (Al/Mg) alloys is still limited. Herein, our main goal is to evaluate the bonding and failure mechanisms of the multi-material joint manufactured by hot pressing as the direct bonding process. 5754 Al alloy and 40 wt.% long glass fiber reinforced-polypropylene (PP) composite are used for the metallic and polymeric adherends, respectively. In this paper, 20 W laser treatment is studied for the surface texturing of AA5754 prior to the adhesiveless (adhesive-free) bonding. It is proved that the laser ablation treatment enhances the adhesion performance of the thermoplastic composite.

2. Experimental Procedures

2.1. Materials

The metallic and thermoplastic composite adherends used for the present research are 3.15 mm thick 5754-H111 Al alloy sheet and 4 mm thick E-glass reinforced (40 wt.%) PP composite, respectively. The nominal chemical compositions and mechanical properties of AA5754 are listed in Table 1 and Table 2, respectively. The panel of composite adherend is fabricated by homopolypropylene composite granules using a hot-pressing technique. The granules are kept in the hot press (Fontijne Presses - LabEcon60 Laboratory Platen Press, The Netherlands) at the constant force of 100 kN and constant temperature of 210 °C to prepare the composite panel. The basic physical and mechanical properties of the thermoplastic composite given by the supplier are 1.20 g/cm³, 119 MPa and 190 MPa for the density, tensile and flexural strength, respectively.

2.2. Laser surface patterning

Laser texturing, which gives the opportunity of obtaining a unique surface pattern via preferential material melting and vaporizing, is carried out on AA5754-H111 to prepare the joint interface of the composite-metal hybrid structure (Figure 1). A grid texture model is produced at the overlap region by using a pulsed fiber laser processing system (SCANLAB GmbH, München, Germany) with the maximum output power of 20 W. The laser beam works at

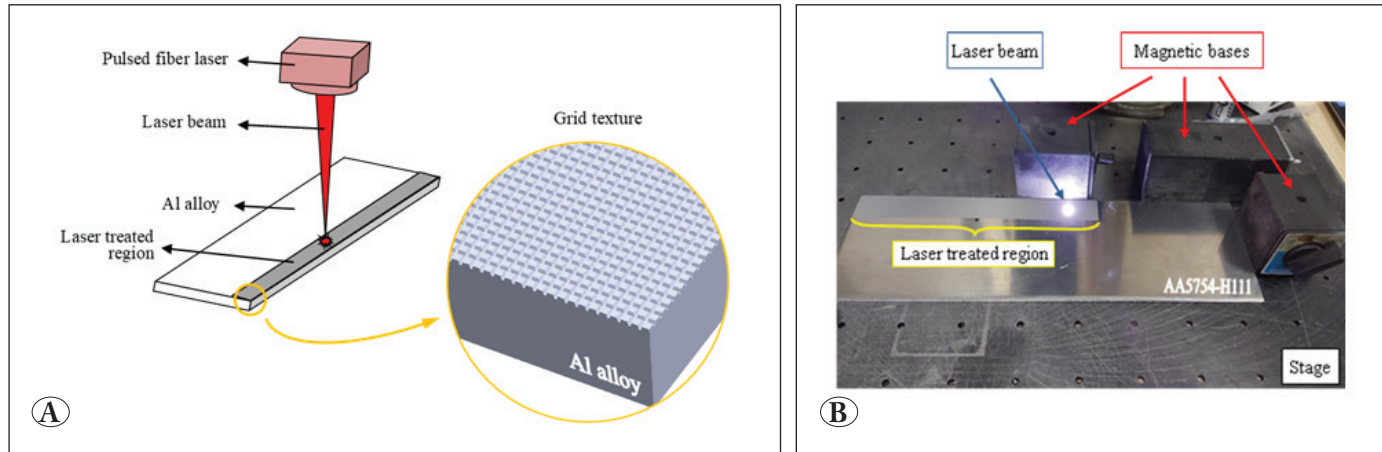


Figure 1. A) Schematic representation of the laser surface texturing, B) Processing of the AA5754-H111 surface.

Table 1. Chemical composition of 5754 Al alloy (wt.%).

Material	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Cu	Zn	Ti	Al
AA5754-H111	2.6-3.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.1	0.2	0.15	Balance

Table 2. Properties of the metallic adherend by the supplier.

Properties	AA5754-H111
Tensile strength (MPa)	190-240
Yield strength (MPa)	80
Elongation (50%)	18

the wavelength of 1064 nm and has a focal spot diameter of 32 μm . The laser surface texturing is performed in an open atmosphere. The laser beam is maintained perpendicular to the sample surface during the treatment and the focusing length is arranged as 215 mm. The laser processing parameters utilized for the irradiation of the surface of Al alloy substrate such as percentage of maximum power (η), scanning speed (v) and pulse frequency (f) are set as 100%, 300 mm/s and 25 kHz, respectively. The designed grid texture consists of equidistant grooves that have specific dimensions as a groove width of $\sim 200 \mu\text{m}$ and a centerline distance of $\sim 500 \mu\text{m}$ between adjacent grooves. Laser processing is carried out through eight consecutive scans with the same process parameters in order to allow adequate depth and thus, favorable micro interlocking between the polymer-Al alloy. Subsequently, in order to eliminate possible contaminants, surface cleaning is carried out through acetone and the metallic sheet is then dried with compressed air. After the surface modification of AA5754 substrate, 3D mapping of the laser ablation-treated region is also examined in an area of $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ via Ambios XP-2 Surface Profilometer.

The macrograph and micrograph investigations of the grid texture and joint interface are also performed. SEM and optical microscopy (OM) are utilized for the examinations.

2.3. Direct bonding process

Firstly, the surface-treated Al sheet is placed at the bottom of a mold with appropriate dimensions. The composite is then positioned on the metal surface to form the SLJ with the lap length of 25.4 mm. Hot-pressing joining of the PP composite is finally performed onto the AA5754 sheet through the hot press used in the fabrication of composite adherend at 210 $^{\circ}\text{C}$ and 100 kN force in the processing time of 50 min. Herein, polytetrafluoroethylene (PTFE) films are utilized between the adherends and metal press platens to prevent the melted PP sticking to the press. The schematic illustration and the details of hot-pressing process are shown in Figure 2.

2.4. Mechanical testing and fractographic examination

Tensile-shear properties of the SLJ are evaluated through the universal testing machine (Shimadzu AG-X) with a 100 kN load cell at a room temperature. The crosshead speed is set at 13 mm/min according to the procedure of ASTM D5868 (ASTM International 2014). Force-displacement data are provided by the test machine. Figure 3 demonstrates the SLJs investigated in this work. Fractured surfaces of the tensile-shear test specimens are scrutinized through the SEM (Thermo Scientific Apreo S) at 7.5 kV to have an insight of morphology and failure mechanism.

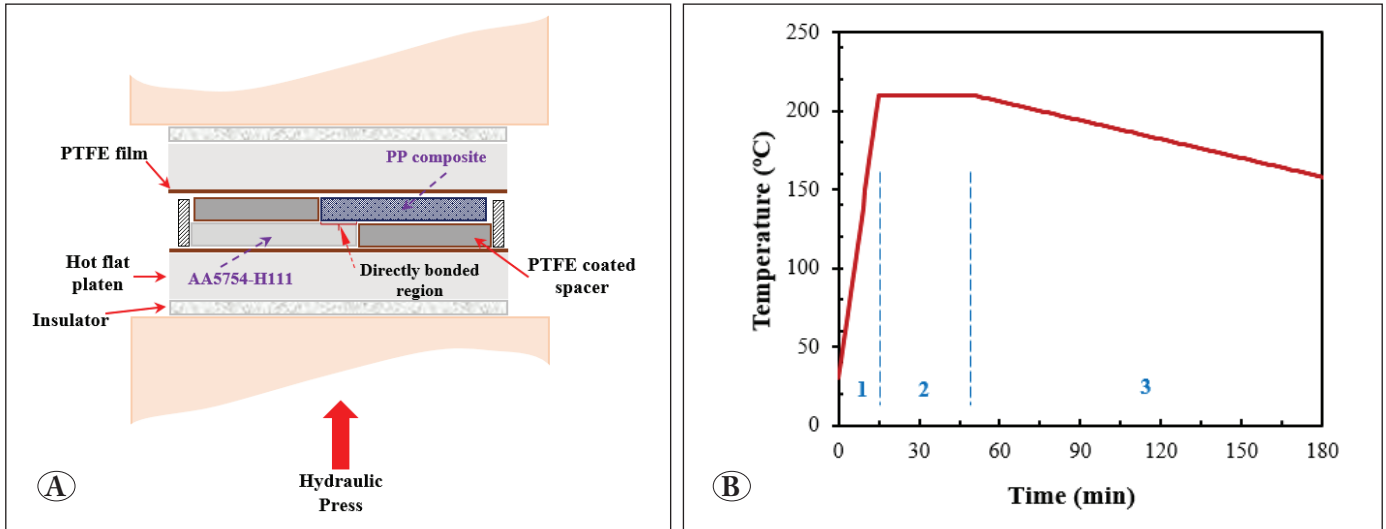


Figure 2. Hot-pressing process: A) Schematic diagram, B) Temperature curve.

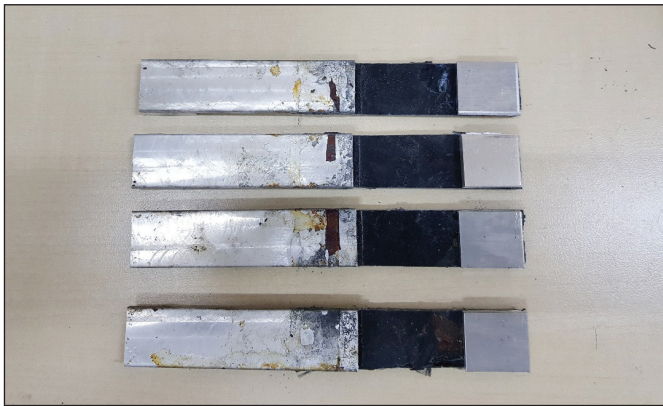


Figure 3. Tensile-shear test specimens.

The surfaces of the samples are sputter-coated with a thin layer of gold-palladium (Au-Pd) before the investigations. Fractured surfaces are inspected to observe signs of failure at the joint interface and at the composite adherend.

3. Results and Discussions

3.1. Laser ablation morphology and interface characterization

In the designs that two parts are directly joined to each other, surface preparation has an important role in obtaining favorable adhesion and joint strength (Maressa et al. 2015). Depending on the process parameters that exceed the specific threshold energy values for ablation of the metallic adherend, a controlled increase of the adhesion and mechanical interlocking area has been ensured during laser texturing (Akman et al. 2021). Figure 4 shows the surface macrography and morphology of the obtained texture on

the joint surface of the Al plate via laser ablation. It can be clearly seen from the surface macrography and morphology that a regular grid texture has been successfully fabricated on the joint surface. In the morphology findings, the yellow zones depict the unprocessed surface regions while the blue zones designate the bottom of the ablated grooves. The sharp-pointed red ridges refer to the cast structured micro burrs that formed around the processed zone due to the splashing and then rapid solidification of the melted material during the laser ablation. These micro splashes of the melted Al alloy have resulted in the formation of a complex morphology that significantly increases the adhesion area on the joint surface during the laser-generated texturing process (Figure 5). The cross-section of the joint interface (Figure 6) shows the profile and specific dimensions of the grid texture clearly. The mean widths of the unprocessed surface (top of the grid texture) and grooves with inclined surface geometry have been obtained as $273.7 \pm 4.8 \mu\text{m}$ and $211.7 \pm 4.4 \mu\text{m}$, respectively. The measured dimensions of the surface profile are in good agreement with the surface morphology results. The cross-section image also informs the wetting state at the interface and fiber distribution in the composite. A full wetting and penetration have been observed that point out the sufficient bonding between the thermoplastic composite and Al alloy. Irregular dispersion of the longitudinal and latitudinal sections of the fibers in Figure 6 indicates the random distribution of fibers in the composite structure. As in similar studies, the intense burr formation that enhances the surface roughness, micro interlocking, and thereby the joint strength of the directly bonded aluminum-composite hybrid structure is obvious

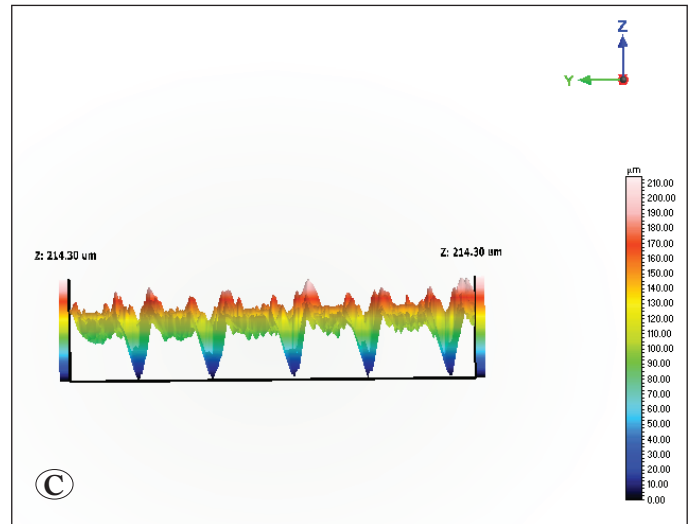
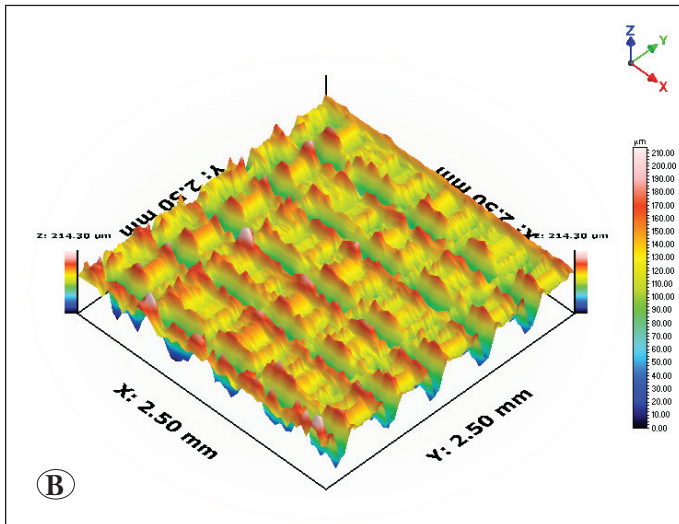
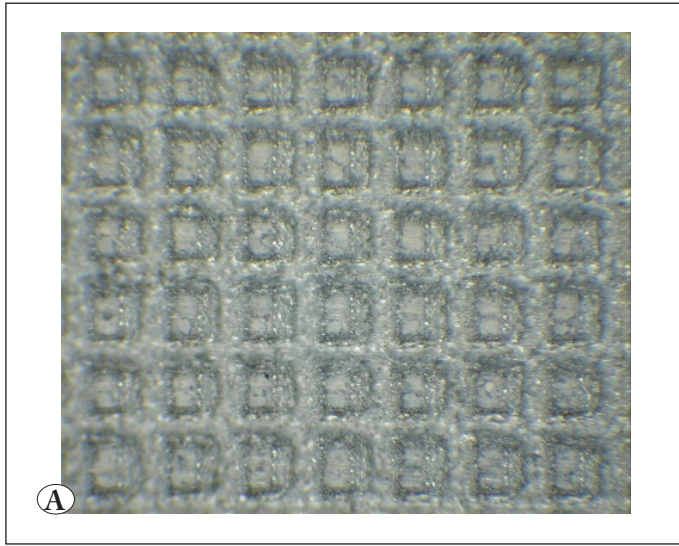


Figure 4. Macrostructure and 3D mapping images of the laser-treated surface: **A)** macrograph, **B)** isometric view, **C)** cross-section view.

on the grid-textured surface (Wu et al. 2016, Harris and Beevers 1999). It is noteworthy to mention that the laser ablation modifies the surface physicochemical properties of the Al alloy significantly (Wan et al. 2022). Besides obtaining a rough and complex-shaped surface, a thicker oxide layer is also generated on the Al surface by micro-scaled locally created high temperatures during the laser ablation (Al-Sayyad et al. 2019). Wu et al. (2016) stated that the oxide layer enhances the surface hydrophilicity of Al surfaces. Consequently, the laser-irradiation also makes an additional contribution to the improvement of the shear strength via enhancing the surface wetting properties which ensures a favorable microinterlocking at the bonding interface.

3.2. Tensile-shear properties

Figure 7 shows the experimental force-displacement curves obtained under quasi-static tensile loading. The average

maximum tensile force is noted as 1186.46 N. It can be obtained from the figure that two of the samples exhibit similar response as presented by the linear trend subsequent to the nonlinear increase at the initial response with the increase in displacement. The trend of these joints translates from non-linear to linear at the tensile displacement of about 1.3 mm. The linear behavior after initial recovery indicates that the joints behave elastically without a plastic process. After reaching the ultimate tensile force, brittle fracture with a rich sound is reported. The failure mode of these two samples is mainly included as fiber tear failure with a large amount of fibers remaining on the Al sheet. Failure position after the tensile-shear testing is also exhibited in Figure 8. Considering the specimens failed from the composite adherend (Sample_2 and Sample_3 in Figure 7), it can be clearly seen that there is a larger extension rather than a sudden load drop after the maximum level. It is noteworthy

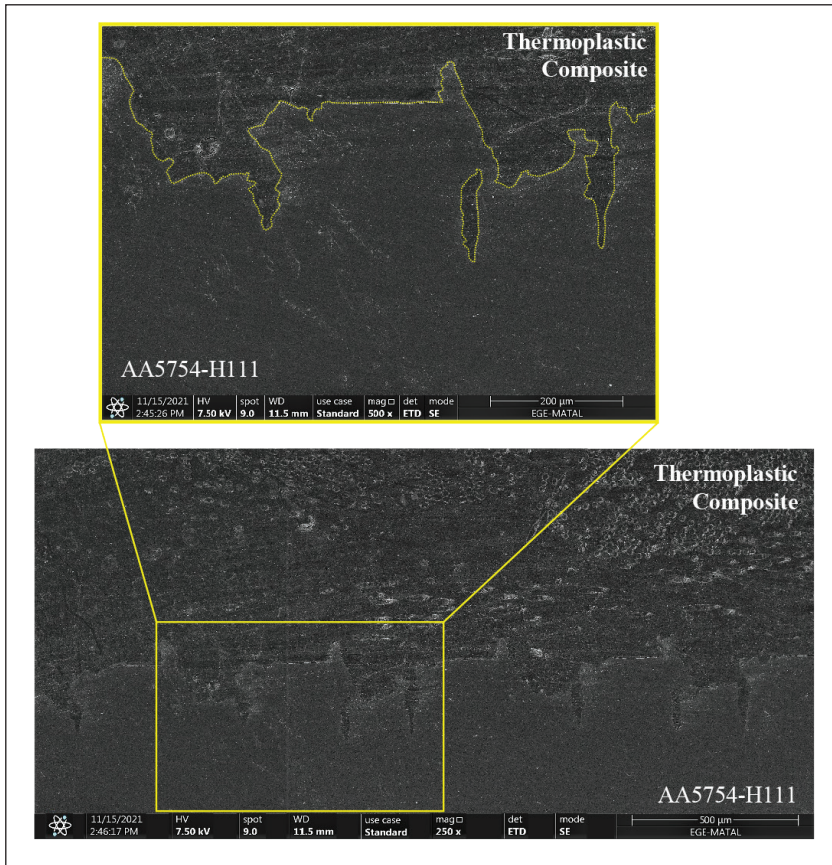


Figure 5. SEM image of the complex surface profile at the joint interface.

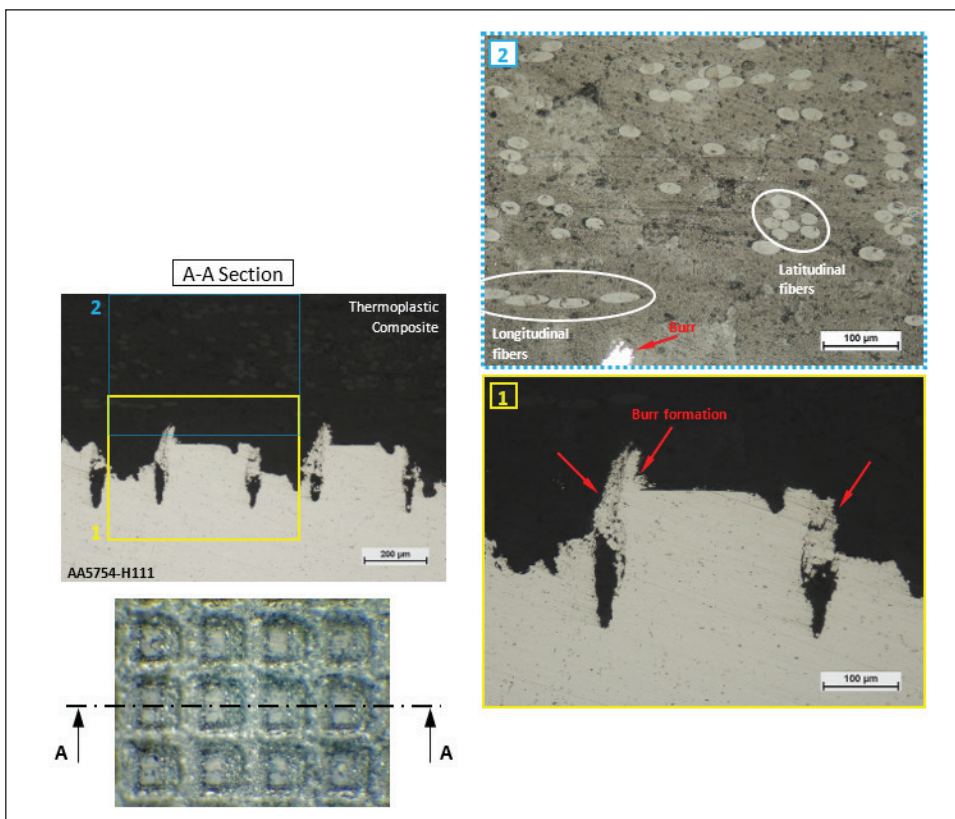


Figure 6. Optical micrograph of the joint cross-section.

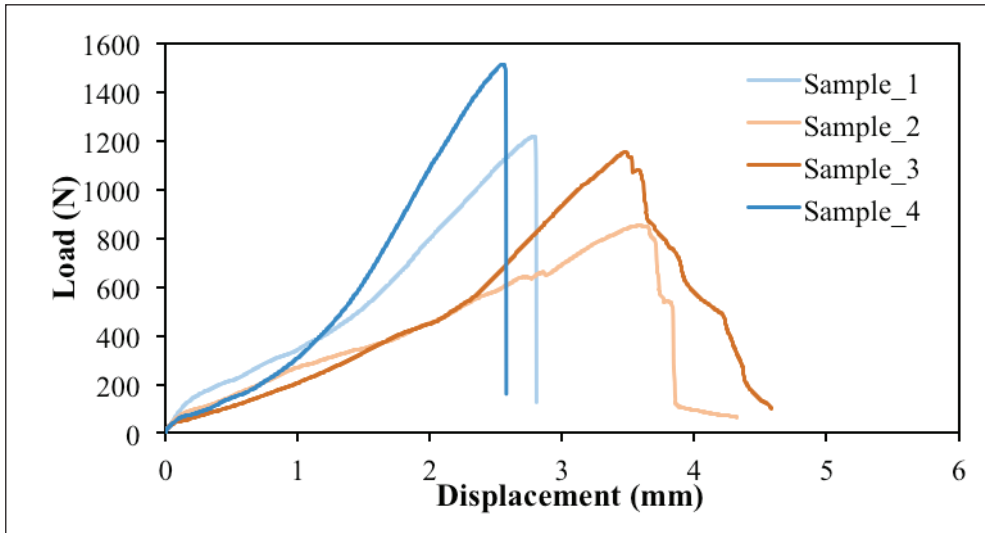


Figure 7. Response curves of SLJs under tensile loading.

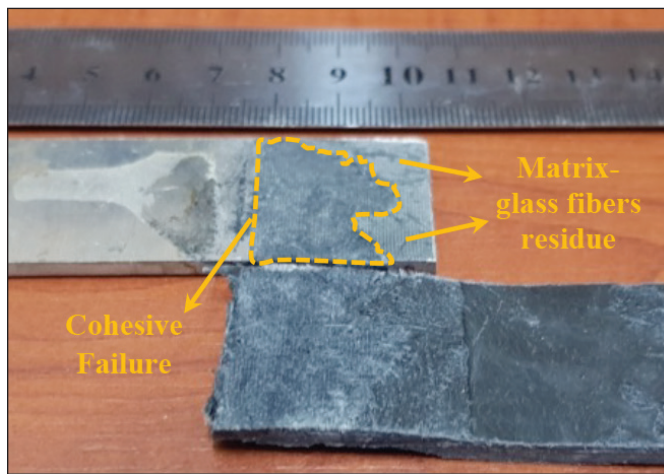


Figure 8. Failure position and surface appearance of SLJs.

that the failure elongation is evidently greater as the damage in the polymeric material allows the composite to deformation (Oztoprak 2021a). The other point that should be considered here is the thermal cycle applied during the direct bonding process, but even if the situation in question may be effective, the absence of interface damage at the measured load values is very important in terms of evaluating the joint strength.

3.3. Failure mechanisms

To get insight into the failure modes of the dissimilar joints, fracture surfaces of the samples after tensile-shear testing are evaluated. Figure 9 and Figure 10 exhibit the SEM observations on the metallic adherend of the specimen failed at the joint interface. As can be seen in Figure 9, the polymer fills all grooves, although the surface locally shows a cleaner

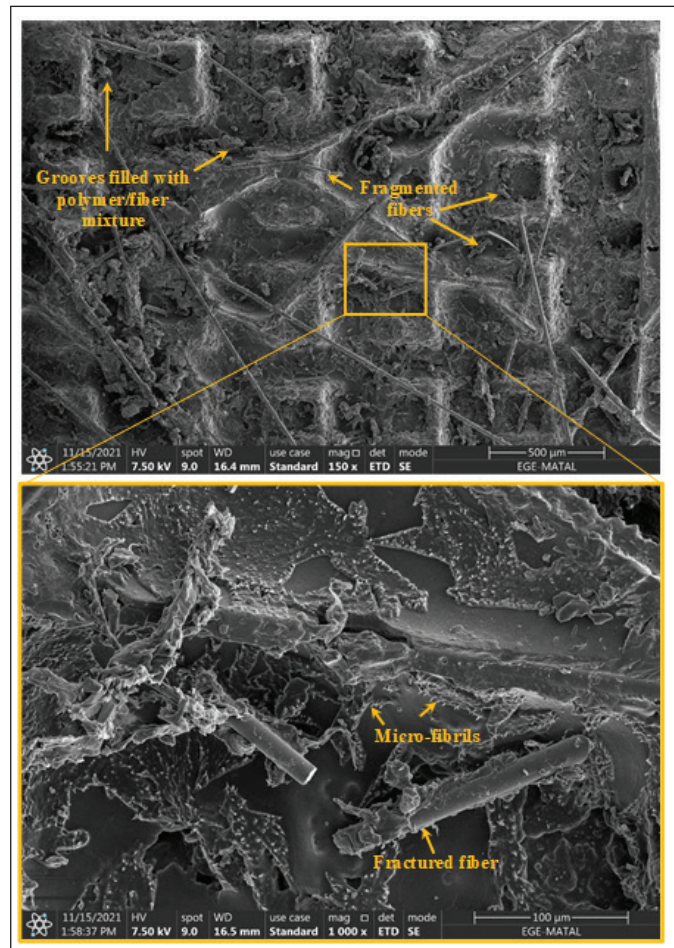


Figure 9. SEM images of the joint interface at the 5754 Al with polymer-fibers residue.

metal surface than other regions. Additionally, fractured fibers and micro-fibrils in the polymer draw the attention. Except for this region, which takes place in a smaller area, cohesive failure is observed. Considering Figure 10, the surface undergoes fiber/matrix debonding in addition to the fragmented fibers. Herein, it has been realized that the debonding of the fibers is not smooth, the cohesive matrix confirms the strong adhesion. Similar to the metal surface, the morphology on the composite presents the fiber fracture and debonding (Figure 11). Fragmented fibers are the dominant failure indication on the surface as shown in Figure 12. On the other hand, the fracture mechanism of the joint changes from fiber fracture to pulled-out fibers for the specimens failed from the PP composite (Figure 13), which leads to decrease in the ultimate force to failure. Poor fiber/matrix adhesion in the sample with smooth fiber surfaces results in fracture easily and rough structure of the polymer confirms the ductile fracture of the sample.

4. Conclusions

In this study, fracture surface observation of the AA5754-PP composite assembly subjected to tensile-shear loading is performed. To provide mechanical micro-interlocking, laser micro-structure with grid texture is fabricated on the metal adherend. Bonding strength of the SLJ is experimentally evaluated. The main findings of the work are as follows:

1. After the laser surface texturing, an intense re-cast micro burr formation is observed on the laser-treated region that increases the surface roughness through the formation of a complex morphology with the micro splashes of the melted Al alloy, thereby the joint strength.
2. Full penetration of the thermoplastic composite in the laser-etched grooves is reported that results in obtaining a favorable bonding.
3. Under quasi-static tensile loading, the samples are fractured from two different regions (interface and

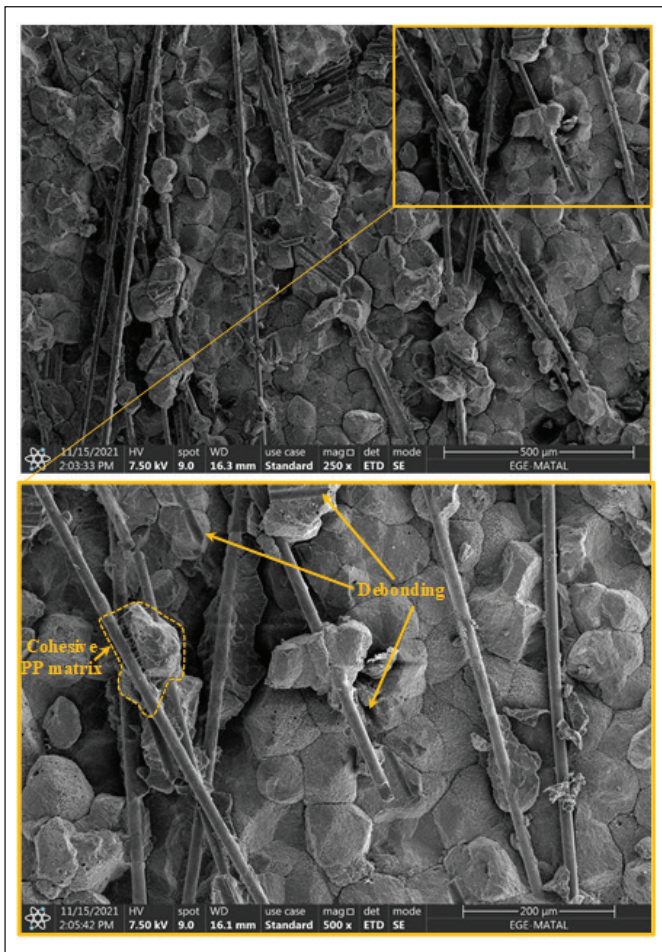


Figure 10. SEM images of the joint interface at the 5754 Al with cohesive failure.

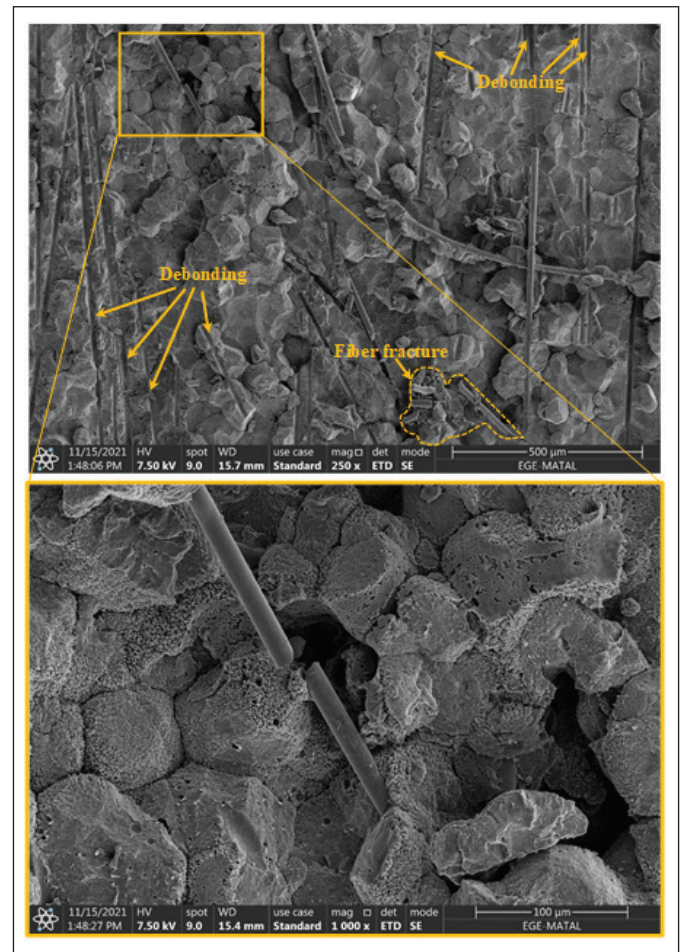


Figure 11. SEM images of the joint interface at the composite adherend with strong bonding.

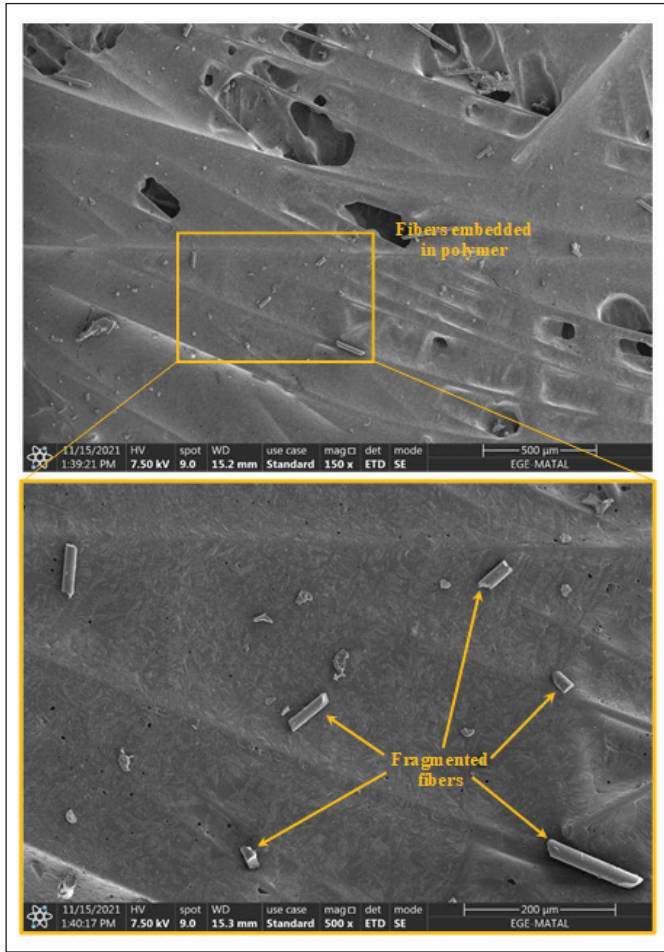


Figure 12. SEM images of the joint interface at the composite adherend with smoother fracture surface.

composite adherend). 1186.46 N is calculated as the average maximum tensile force of the hybrid GFRT-P-Al alloy joint.

4. Fractography evidences that the fracture mechanisms of the samples, which fail from the joint interface and the composite adherend, are fiber fracture and fiber pull out, respectively.

Acknowledgments

Thanks to Seykoç Aluminum and Nuh Kompozit for their support in the supply of the metallic adherend and composite granules, respectively.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

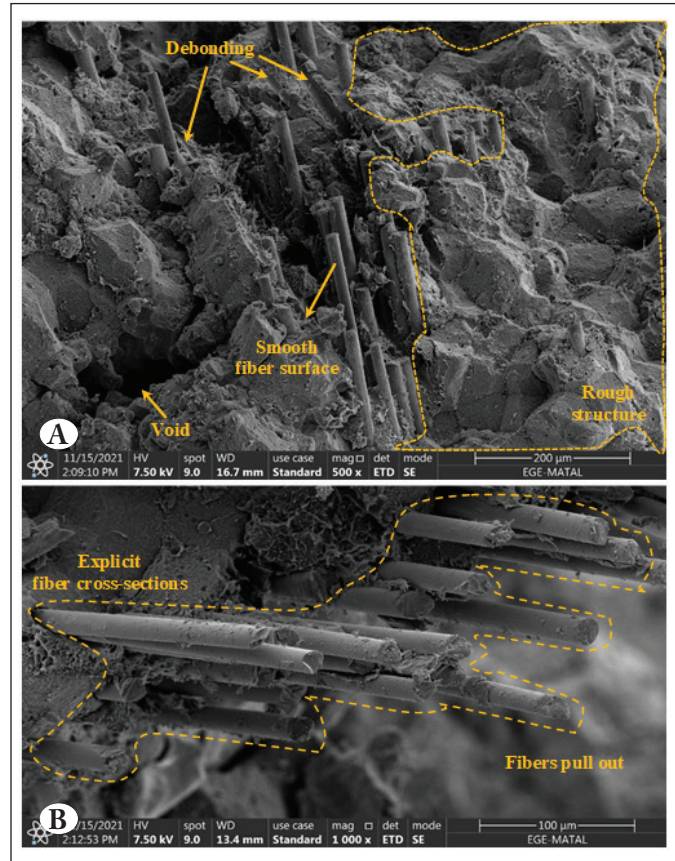


Figure 13. SEM images of the composite adherend in different magnifications: A) 500x, B) 1000x.

5. References

- Agha, A., Abu-Farha, F. 2021. Viscoelastic model to capture residual stresses in heat cured dissimilar adhesive bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 107: 102844. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102844>
- Akman, E., Bora, M. Ö., Çoban, O., Öztoprak, B. G. 2021. Laser-induced groove optimization for Al/CFRP adhesive joint strength. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 107: 102830. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102830>
- Akpınar, S. 2019. The Effect of Adherend Thickness and Width on Fracture Behavior in Adhesively Bonded Double Cantilever Beam Joints. *European Mechanical Science*, 3(3): 83-87. <https://doi.org/10.26701/ems.566773>
- Al-Sayyad, A., Bardon, J., Hirschhahn, P., Vaudémont, R., Houssiau, L., Plapper, P. 2019. Influence of Aluminum Laser Ablation on Interfacial Thermal Transfer and Joint Quality of Laser Welded Aluminum-Polyamide Assemblies. *Coatings*, 9: 768. <https://doi.org/10.3390/coatings9110768>
- ASTM International. 2014. Standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding, ASTM D5868-01(2014), ASTM International Standards, West Conshohocken.

- Bilgin, M., Karabulut, Ş., Özdemir, A. 2019.** Effect of preheating and dry ice cooling on dissimilar friction stir welding of AA7075-T6 and AZ31B. *Journal of Polytechnic*, 22(3): 655-663. <https://doi.org/10.2339/politeknik.426649>
- Cetkin, E. 2021.** Investigation of the Effects of Use of GNP and GNP Reinforced Nano-Fibers with Epoxy Adhesive on Tension Tests. *European Journal of Technique*, 11(2): 175-181. <https://doi.org/10.36222/ejt.957654>
- Dantas, M. A., Carbas, R. J. C., Marques, E. A. S., Kushner, D., da Silva, L. F. M. 2021.** Flexible tubular metal-polymer adhesive joints under torsion loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 105: 102787. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102787>
- Dasilva, S., Jimenez-Suarez, A., Rodríguez, E., Prolongo, S. G. 2021.** Quality assessment and structural health monitoring of CNT reinforced CFRP and Ti6Al4V multi-material joints. *Materials & Design*, 210: 110118. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110118>
- Feng, Z., Zhao, H., Tan, C., Zhang, X., Chen, B., Song, X. 2021.** Nanosecond laser ablation for improving the strength of CFRTP and aluminum alloy adhesively bonded joints. *Composite Structures*, 274: 114369. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114369>
- Gultekin, K. 2022.** Comparison of the effect of modified and unmodified boron carbide (B₄C) nanoparticles on the mechanical properties of structural adhesives. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 11(1): 198-206. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.984658>
- Harris, A.F., Beevers, A. 1999.** The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion". *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 19: 445-452. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(98\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(98)00061-X)
- Huang, W., Sun, L., Liu, Y., Chu, Y., Wang, J. 2021.** Effects of low-energy impact at different temperatures on residual properties of adhesively bonded single-lap joints with composites substrate. *Composite Structures*, 267: 113860. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113860>
- Kanani, A. Y., Hou, X., Ye, J. 2020.** The influence of notching and mixed-adhesives at the bonding area on the strength and stress distribution of dissimilar single-lap joints. *Composite Structures*, 241: 112136. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112136>
- Liu, X., Zhu, H., Xie, Y., Xu, L., Lin, N., Lu, L. 2020.** Optimization of microstructural morphology via laser processing to enhance the bond strength Al-CFRP. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 40(11-12): 463-473. <https://doi.org/10.1177/0731684420973066>
- Liu, Y., Su, J., Ma, G., Han, X., Tan, C., Wu, L., Chen, B., Song, X. 2021a.** Effect of the laser texturing width on hot-pressing joining of AZ31B and CFRTP. *Optics & Laser Technology*, 143: 107350. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107350>
- Liu, Y., Su, J., Tan, C., Feng, Z., Zhang, H., Wu, L., Chen, B., Song, X. 2021b.** Effect of laser texturing on mechanical strength and microstructural properties of hot-pressing joining of carbon fiber reinforced plastic to Ti6Al4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 65: 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.021>
- Maressa, P., Anodio, L., Bernasconi, A., Demir, A.G., Previtali, B. 2015.** Effect of surface texture on the adhesion performance of laser treated Ti6Al4V alloy. *The Journal of Adhesion*, 91(7): 518-537. <https://doi.org/10.1080/00218464.2014.933809>
- Min, J., Wan, H., Carlson, B. E., Lin, J., Sun, C. 2020.** Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics & Laser Technology*, 128: 106188. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106188>
- Oztoprak, N. 2021a.** Directly bonded single lap joints of SiCp/AA2124 composite with glass fiber-reinforced polypropylene: Hole drilling effects on lap shear strength and out-of-plane impact response. *Journal of Composite Materials*, 55(20): 4045-4061. <https://doi.org/10.1177/00219983211031648>
- Oztoprak, N. 2021b.** Investigation of metal-matrix composite based hybrid laminates under quasi-static penetration and Charpy impact loading. *Journal of Manufacturing Processes*, 68(A): 1328-1338. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.063>
- Schanz, J., Meinhard, D., Dostal, I., Riegel, H., De Silva, A. K. M., Harrison, D. K., Knoblauch, V. 2022.** Comprehensive study on the influence of different pretreatment methods and structural adhesives on the shear strength of hybrid CFRP/aluminum joints. *The Journal of Adhesion*, 98(12): 1772-1800. <https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1938004>
- Wan, H., Min, J., Lin, J. 2022.** Experimental and theoretical studies on laser treatment strategies for improving shear bonding strength of structural adhesive joints with cast aluminum. *Composite Structures*, 279: 114831. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114831>
- Wu, Y., Lin, J., Carlson, B.E., Lu, P., Balogh, M. P., Irish, N.P., Mei, Y. 2016.** Effect of laser ablation surface treatment on performance of adhesive-bonded aluminum alloys. *Surface & Coatings Technology*, 304: 340-347. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.04.051>
- Zhang, C., Chen, L., Zhang, Y., Wang, G., Jin, J. 2021.** Effect of laser processing microstructure on the bonding strength and failure mode of 7075-T6 aluminum alloy adhesive joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 66: 302-312. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.028>
- Zhou, X., Zhao, Y., Chen, X., Liu, Z., Li, J., Fan, Y. 2021.** Fabrication and mechanical properties of novel CFRP/Mg alloy hybrid laminates with enhanced interface adhesion. *Materials & Design*, 197: 109251. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109251>



“Metallerin ve Plastiklerin Yüzey İşlemi (STM)” Sektöründe Faaliyet Gösteren Tesislerin EKÖK Uyum Durumunun İl Bazında Değerlendirilmesi

Provincial Assessment of IPPC Compliance Status of Facilities Operating in the “Surface Treatment of Metals and Plastics (STM)” Sector

Mehmet Kazım Yetik , Rahman Çalhan* 

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

Öz

Bu çalışma “Metallerin ve Plastiklerin Yüzey İşlemi (STM)” sektöründe faaliyet gösteren tesisler Referans Belgesi (BREF), 96/61 / EC sayılı Konsey Direktifinin (IPPC Direktifi) 16 (2) Maddesi uyarınca hazırlanan Mevcut En İyi Teknikler (MET) kapsamında Türkiye’de faaliyet gösteren tesislerin Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü (EKÖK) mevzuatına uyum durumunun, EKÖK’e geçiş sürelerinin ve illere göre dağılımlarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, direktif kapsamına giren tesislere anket düzenlenmiş ve tesislerden gelen cevaplar istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre kapsam dahilindeki tesislerin Türkiye’de illere göre dağılımları, EKÖK uyumu için hangi MET’lere öncelik verilmesi gerektiği ve gereken iyileştirme/yatırımlar için gereken süreler belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Entegre kirlilik önleme ve kontrol, Metallerin ve plastiklerin yüzey işlemi, Mevcut en iyi teknikler, Yüzey kaplama, Galvaniz, Atıksu

Abstract

This study is carried out in Turkey within the scope of Best Available Techniques (BAT) prepared in accordance with Article 16 (2) of Council Directive 96/61 / EC (IPPC Directive) Reference Document (BREF) for facilities operating in the “Surface Treatment of Metals and Plastics (STM)” sector. It was conducted to ascertain the level of compliance with the Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) regulations of the facilities operating in Turkey, the transitional periods to IPPC, and their distribution by provinces. For the study, a survey of the facilities covered by the directive was conducted, and the responses from the institutions were statistically analyzed. According to the results of the analysis, the distribution of the facilities within the scope by provinces in Turkey, which BAT should be prioritized for IPPC compliance, and the time required for the necessary improvements/investments were determined.

Keywords: Integrated pollution prevention and control, Surface treatment of metals and plastics, Best available techniques, Surface coating, Galvanizing, Wastewater

1. Giriş

Artan dünya nüfusu, gelişen teknoloji ve değişen yaşam şartları insanların tüketim alışkanlıklarının değişmesine neden olurken artan çevre kirliliği ile birlikte çevre insan sağlığı olumsuz şekilde etkilenmiştir. Çevre kirliliğini önlemek amacıyla ortaya çıkan kirleticileri bertaraf etmek amacıyla

çok farklı teknik/teknolojiler geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Boru sonu veya kirlilik kontrolü teknikleri olarak adlandırılan bu yöntemler sadece ortaya çıkan kirleticilerin çevresel etkilerinin azaltılmasını sağlamaktadırlar (Çavuşoğlu vd. 2019). Günümüzde kirlilik kontrolü yaklaşımının yerini, kirliliği kaynağında azaltılmasını, su, enerji ve hammadde kullanımının kontrol edilmesini sağlayan temiz/sürdürülebilir üretim prensibi almaya başlamaktadır. Bu kapsamda Avrupa Birliği (AB), üye devletlerde endüstriyel faaliyetler sonucunda ortaya çıkan emisyonların azaltılmasını sağlamak amacıyla 1996 yılında Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol (EKÖK) direktifini (96/61/EC) ortaya çıkarmıştır. EKÖK direktifi 2010 yılında Endüstriyel Emisyonlar

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: rahmancalhan@karabuk.edu.tr

Mehmet Kazım Yetik  orcid.org/0000-0003-1150-3968
Rahman Çalhan  orcid.org/0000-0002-3894-8468



Direktifi (EED) (2010/75/AB) olarak değiştirilmiş ve AB ülkeleri için endüstrilerden kaynaklanan emisyonların düzenlenmesindeki temel mevzuat olarak kullanılmaya başlanmıştır (Environment Agency 2004, Vázquez vd. 2015). EED'nin uygulanmasında endüstriyel faaliyetlerden ortaya çıkan emisyonların azaltılması veya önlenmesi amacıyla Mevcut en iyi tekniklerin (MET) kullanılması önerilmektedir. MET'ler Sevilla'da (İspanya) bulunan Avrupa EKÖK Bürosu'nun koordinasyonunda AB üye devletlerinde faaliyet gösteren endüstriyel kuruluşlar, akademisyenler ve çevre ajanslarının ortaklığı ile ortaya çıkarılmıştır (Giner Santonja ve Karlis 2020). MET referans dokümanlarında ilgili sektör kapsamında üretim yapılan prosesler ve prosesler sonucunda ortaya çıkan kirleticiler ile ilgili bilgiler verilmektedir. MET referans dokümanlarının içerisinde bulunan MET sonuçlarında ise komisyon tarafından kabul edilen ve çevresel açıdan en yüksek performansa sahip uygulamalara yer verilmektedir (Karström vd. 2020).

Avrupa birliği üye devletleri, ilgili endüstriyel kuruluşlar ve çevre odaklı sivil toplum kuruluşları arasında, MET'ler hakkında bilgi paylaşımında bulunma ve ilgili düzenlemeleri yerine getirme sorumluluğu Avrupa EKÖK Bürosuna aittir. Bilgi paylaşımı ile EED'nin Avrupa Birliği'nde faaliyet gösteren işletmelerde etkin bir şekilde uygulanması amaçlanmaktadır. Bu amaçla zaman zaman sektörel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlardan bazıları, IPPC Direktifleri ile süt endüstrisinde ve kağıt endüstrisinde farklı ülkelerde incelemeler gerçekleştirilmiş çalışmalardır (Honkasalo, Rodhe, ve Dalhammar 2005, Silvo, Jouttijärvi, ve Melanen 2009).

Metaller ve plastikler, dekorasyon, sertliği ve aşınma direncini artırmak, korozyonu önlemek ve boyama gibi diğer yüzey işlemleri için adezyonu artırmak amacıyla yüzey işlemlerine tabi tutulurlar. Yüzey kaplama işlemine tabi tutulmuş olan ürünler otomotiv, inşaat, içecek-yiyecek kutuları, elektronik ürünler, havacılık gibi oldukça fazla kullanım alanına sahiptirler. Bu nedenle yüzey kaplama işlemi insan yaşamında oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu sektör ile ilgili genel çevresel problemler; enerji ve su tüketimi, hammadde kullanımı, katı ve sıvı atıklardan kaynaklanmaktadır. Ancak proses genelinde sürekli olarak yıkama-durulama işlemlerinden kaynaklı olarak su tüketimi temel problem olarak değerlendirilmektedir. Yüzey kaplama sektöründen kaynaklanan çevresel etkilerin en aza indirilebilmesi için üretim sırasında, su, enerji ve hammadde kullanımının optimize edilmesi, üretim prosesinin etkin bir şekilde kontrol edilmesi, daha az atık ortaya çıkaracak yöntemlerin tercih edilmesi ve ortaya

çıkan atıkların yeniden kullanılması, geri dönüştürülmesi veya geri kazanılması işlemleri uygulanabilir (Nakonieczny ve Kieszkowski 2006).

Ülkemizde sektörler bazında yeni uygulanacak olan EKÖK mevzuatının, sektörler ile uyumlu bir şekilde ilerleyebilmesi ve sektör temsilcilerinin hem süreç hakkında bilgilendirilmesi hem de sürece dahil olarak birlikte şekillenmesinin sağlanabilmesi açısından T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞB) tarafından çalışmalar yürütülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalarda, ilgili sektörlerde saha ziyaretleri gerçekleştirilmiş, prosesler yerinde incelenerek üretim koşulları değerlendirilmiş ve yeni mevzuata uyum durumu ve geçiş süreci ile ilgili bilgi alışverişinde bulunulmuştur. Bugüne kadar çimento endüstrisi, otomotiv endüstrisi, büyük yakma tesisleri, tekstil endüstrisi ve demir-çelik üretim ve işleme endüstrisi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Kocabaş vd. 2009). Metallerin ve plastiklerin yüzey işlemleri ile ilgili çalışmalar, demir-çelik üretim ve işleme endüstrisi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada metallerin ve plastiklerin yüzey işlemleri ile ilgili faaliyet gösteren ve EED kapsamında değerlendirilmeye alınan tesisler üzerinde gerçekleştirilen anket çalışması ile elde edilen sonuçlar bölgesel olarak analiz edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Çalışma alanı ve kapsamı

Çalışma kapsamında öncelikle tüm Türkiye'de metallerin ve plastiklerin yüzey işlemleri alanında faaliyet gösteren tüm tesislerin envanteri çıkarılmıştır. “Metallerin ve Plastiklerin Yüzey İşlemi” başlıklı MET Referans Belgesi (Bref), 96/61 / EC sayılı Konsey Direktifinin (IPPC Direktifi) 16 (2) Maddesi uyarınca hazırlanmıştır. Bu dokümanın kapsamı 96/61 / EC sayılı IPPC Direktifinin Ek 1'inci Kısım 2.6'ya göre: **“Sektörlerde tekne hacminin 30 metreküpü aşığı bir elektrolitik veya kimyasal işlem kullanılarak metallerin ve plastiklerin yüzey işlemlerini gerçekleştiren tesisler”** olarak belirlenmiştir (Avrupa Komisyonu, 2006). Envanterde bulunan bütün tesislere entegre çevre bilgi sistemi (EÇBS) üzerinden giriş yaparak doldurabilecekleri anket formu gönderilerek veri giriş yapmaları sağlanmıştır. Ankette tesisteki işlem teknesi hacimleri sorularak, 30 metreküpün altında kapasiteye sahip olan tesisler kapsam dışı tutulmuşlardır. Ayrıca aşağıdaki faaliyetleri yapan tesisler de kapsam dışına tutulmuşlardır (Avrupa Komisyonu, 2008).

- Sertleştirme (hidrojen ayrışması hariç),
- Metallerin buharla biriktirilmesi gibi diğer fiziksel yüzey işlemleri,

- Sıcak daldırma galvanizleme ve demir ve çeliklerin toplu olarak temizlenmesi,
- Çözücü madde kullanarak yüzey işleme süreçleri ve çözücü yağ giderme işlemi,
- Elektro-boyama (elektroforetik boyama)

2.2. Yöntem

Metallerin ve Plastiklerin Yüzey İşlemi” başlıklı MET referans belgesi içerisinde bulunan MET’ler sorular haline dönüştürülerek sektörün mevcut durumunun ve EKÖK mevzuatına uyumu için gerekli olan süre ve maliyet verilerinin elde edilebileceği online bir anket tasarımı gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan anket EÇBS (e-devlet) üzerinden firmaların erişimine açılmış ve tesis sorumlusunun yetkisi ile anketin doldurulması sağlanmıştır. Anket girişi kodları ÇŞB envanteri listesinden alınarak e-posta ile tesis sorumlularına iletilmiştir. Tam sayım olarak tasarlanan çalışma sektöründe faaliyet gösteren ya da bu faaliyeti yürütmekte olan ve ÇŞB’den bu hususta izin belgesi alan tüm işletmeleri (tesisleri) kapsamaktadır. Anket tasarımı için IPPC’de belirtilen sektördeki ilgili hususlar tek tek sorulmuş, soru tasarımı için kullanılan kodlama sıralamaları bakanlığın daha sonra yürüteceği çalışmalara yön verebilmek için ÇŞB uzmanlarıyla belirlenmiştir. Kodlamalarda likert aralıkları göz önünde bulundurulmuştur. Bunun yanında yine uzmanların talepleri doğrultusunda bazı kodlamalarda ek (açık uçlu) açıklamalar istenmiştir. Anket kapsamında değerlendirilen temel başlıklar ve MET kodları Çizelge 1’de verilmiştir. MET başlıkları altında toplam 181 ayrı MET bulunmaktadır. Çalışma gönüllülük esasına dayanmakla birlikte tam sayım olarak değerlendirildiği için çalışma sonrasında elde edilen liste ÇŞB tarafından envanter olarak kullanılacak şekilde yapılandırılmıştır.

Çizelge 1’de verilen MET’ler kapsamında daha temiz üretim gerçekleştirilmesini sağlayacak farklı uygulamalar açıklanmaktadır. Belirtilen uygulamaların, tesislerdeki uygulama durumlarının belirlenebilmesi için tesis yetkililerinden anket sorularına Çizelge 2’de belirtilen cevaplamalardan uygun olanı işaretlemeleri istenmiştir. Eğer ilgili MET’ler tesiste halihazırda uygulanmıyor ve eğer uygulanabilecek durumda ise 0-120 ay aralığında yatırım süresi seçmeleri istenmiştir. Yapılan anket çalışmasında verilen cevapların doğruluğunun teyit edilebilmesi ve veri kalitesini arttırabilmek amacıyla, ÇŞB uzmanları ile birlikte saha ziyaretleri gerçekleştirilerek cevaplar kontrol edilmiştir. Görülen hatalar yerinde düzeltildiği gibi diğer cevaplar üzerinde de aynı hususlarda hata olma ihtimalinden dolayı inceleme yapılmıştır. Ayrıca, anket

Çizelge 1. Anket kapsamında değerlendirilen temel MET başlıkları

MET başlığı	MET kodu
Yönetim teknikleri	MET 5.1.1
Tesis tasarımı, inşaatı ve işletimi	MET 5.1.2
Proses çözeltilerinin çalkalanması	MET 5.1.3
Yararlı girdiler: Enerji ve su	MET 5.1.4
Su ve malzeme atıklarının minimizasyonu	MET 5.1.5
Malzeme geri kazanımı ve atık yönetimi	MET 5.1.6
Genel proses çözeltisi bakımı	MET 5.1.7
Atık su emisyonları	MET 5.1.8
Hava emisyonları	MET 5.1.10
Jig hatlarında dışa sürüklenmeyi en aza indirmek	MET 5.2.2
Tehlikeli maddelerin daha az tehlikeli olanlar ile değiştirilmesi ve/veya kontrol edilmesi	MET 5.2.5
Parlatma ve cilalama için ikame maddelerin kullanılması	MET 5.2.6
Yağ giderme için kullanılabilir ikame maddeler ve seçenekler	MET 5.2.7
Asitle temizleme (dekapaj) ve diğer güçlü asit çözeltileri – çözeltilerin ömrünü uzatma ve geri kazanım teknikleri	MET 5.2.9
Anodlama	MET 5.2.11
Baskılı devre kartları (PCB’ler)	MET 5.2.13

güvenilirliği açısından, her anket doldurulduğunda sistem üzerinden cevap giriş takipleri yapılmış, veri uyumsuzluğu durumunda tesis yetkilisi ile direk iletişime geçilerek gerekli düzeltmelerin yapılması sağlanmıştır. Anketlere verilen cevaplar daha sonra çevrimiçi toplanarak, MATLAB ve Excel paket programları ile analiz edilerek çalışma sonuçları değerlendirilmiştir.

Çizelge 2. Anket sorularına verilebilecek cevaplar

Kod	Tanım
A	Uygulanıyor
B	Uygulanabilir, iyileştirme gerekli
C	Uygulanabilir, yeni yatırım gerekli
D	Uygulanabilir, “Fayda/Maliyet” düşük
E	Uygulanabilir, yapısal değişim gerekli
F	Tesis için geçerli değil

3. Sonuçlar ve Tartışma

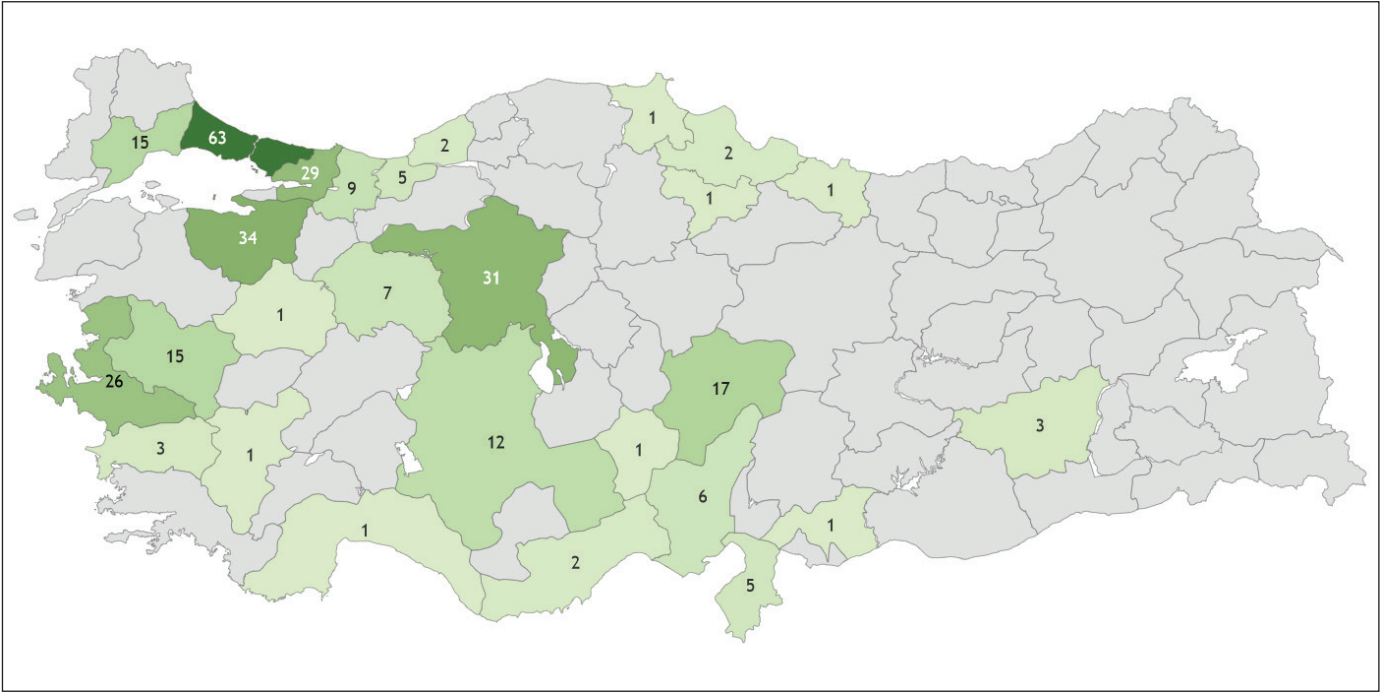
Çalışma kapsamında Metallerin ve Plastiklerin Yüze İşlemi" başlıklı MET Referans Belgesi'nde verilen 181 adet MET için hazırlanan anket çalışmalarına verilen cevaplar değerlendirilmiştir. Yapılan analizlere göre 30 metreküp tekne hacmine sahip olan ve kapsam içerisine giren 294 adet tesis bulunmaktadır. Kapsam dışındaki tesislerin cevapları değerlendirilmeye alınmamıştır. Kapsam içerisine giren tesislerin illere göre dağılımı Şekil 1'de verilmiştir.

Kapsam içerisine giren tesis sayıları incelendiğinde en fazla tesis sayısı 63 ile İstanbul'da bulunmaktadır. Bunu 34 tesis ile Bursa, 31 tesis ile Kocaeli ve 26 tesis ile İzmir takip etmektedir. Bölge bazında değerlendirildiğinde ise en fazla tesis sayısı Marmara Bölgesi'nde bulunmaktadır. Amasya, Antalya, Denizli, Gaziantep, Kütahya, Niğde, Ordu ve Sinop'ta ise sadece 1'er kapsam içi tesis bulunmaktadır.

Yapılan analize göre, Türkiye genelinde bulunan 294 adet tesisten 99'unun herhangi bir yatırım yapmadan EKÖK belgesi almak üzere hazır oldukları tespit edilmiştir. Yurtdışına ihracat yapan firmaların EKÖK uyumluluk durumlarının yurtiçi pazarına üretim yapan firmalara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 2'de ise herhangi bir yatırım yapmadan EKÖK şartlarını taşıyan tesislerin illere

göre dağılımı gösterilmektedir. Türkiye genelinde metallerin ve plastiklerin yüze işlemleri kapsamında faaliyet gösteren ve kapsama dahil olan firmaların %33'ünün EKÖK'e uyumlu olduğu belirlenmiştir. Çizelge 3'te ise halihazırda uygulandığı belirtilen ve tesisler tarafından en çok uygulanan MET'ler gösterilmiştir. Tesislerin en fazla uyguladıkları belirtilen MET'lerin başında, tesiste Çevre Yönetim Sistemi'nin (ÇYS) kurulması ve uygulanması gelmektedir. Bunun yanında tesiste çevresel risklerin azaltılmasına yönelik önlemlerin uygulanması da en fazla uygulanan MET'ler arasında bulunmaktadır.

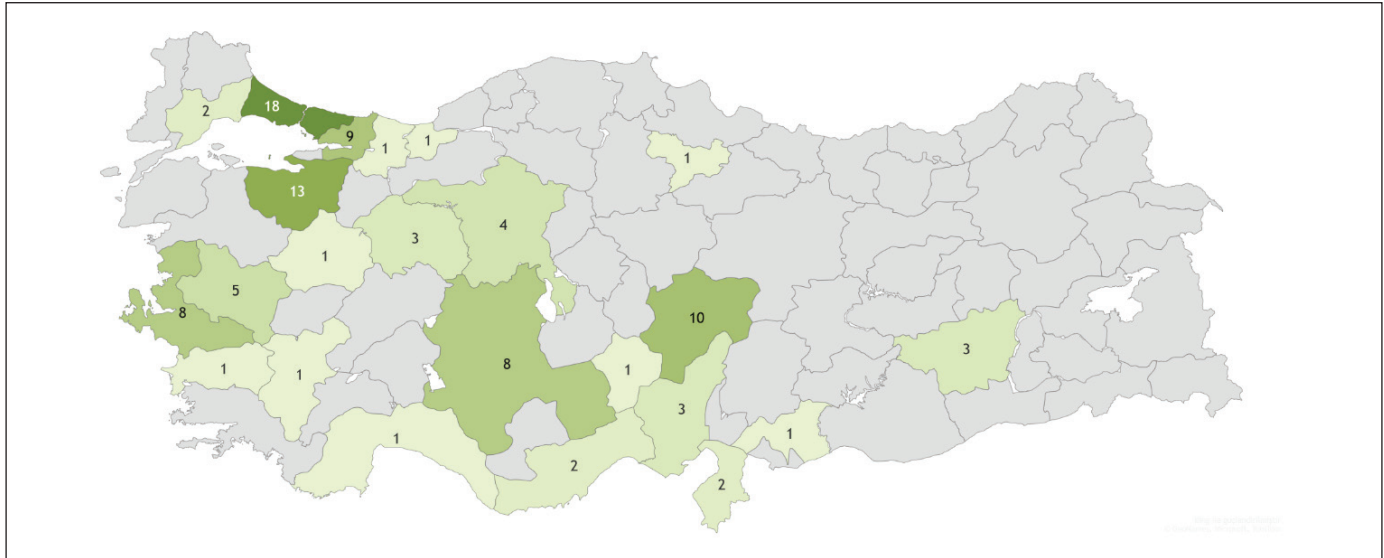
Şekil 3'te MET'lerin uygulanabilmesi için tesislerinde iyileştirme yapılması gerektiğini bildiren işletmelerin illere göre dağılımı görülmektedir. Tesiste iyileştirme yaparak EKÖK'e uyumlu hale gelebilecek tesis sayısı, 32 ile en fazla İstanbul'da bulunmaktadır. İstanbul'u 22 tesis ile Ankara ve 17 tesis ile Bursa takip etmektedir. Çizelge 4'te ise tesislerin uygulanması için iyileştirme gerekli olduğunu belirttiği ilk 5 MET gösterilmektedir. Çizelge 4'e göre tesislerinde herhangi bir çevre yönetim sistemi bulunmayan ve uygulanmayan tesislerin, genellikle "Çevre Yönetimi" başlığı altındaki MET'lere uyum sağlayabilmesi için iyileştirme yapması gerektiği görülmektedir. Bunun yanında, tesislerin mevcut çevresel durumlarını iyileştirmek amacıyla diğer firmalar ile herhangi bir karşılaştırma yapmadıkları da tespit edilmiştir.



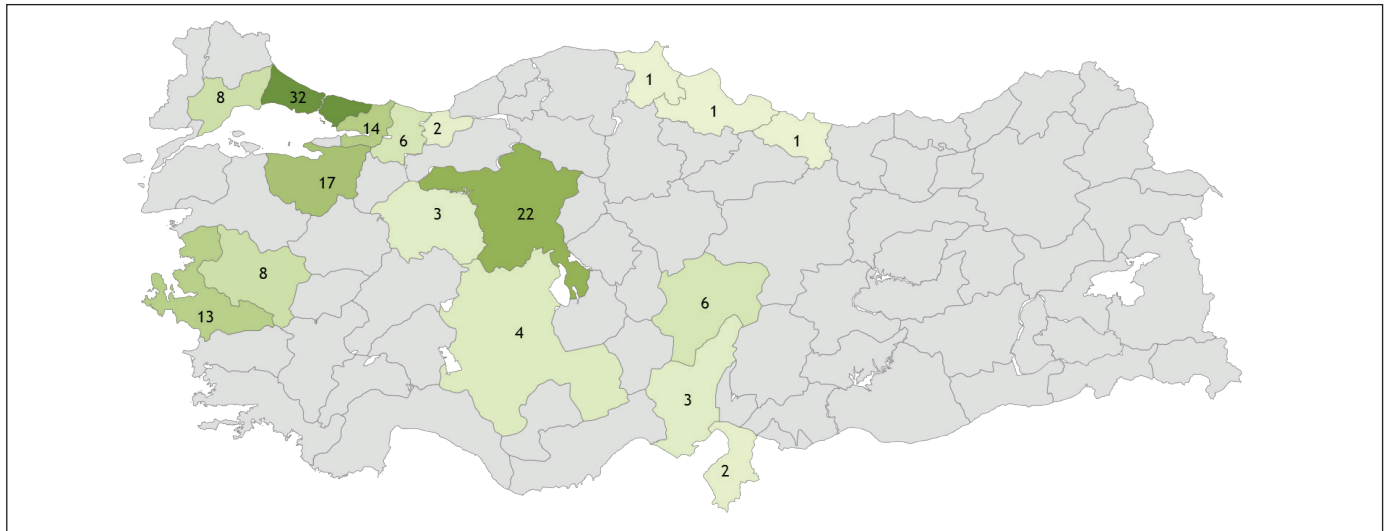
Şekil 1. Kapsam içerisine giren tesislerin illere göre dağılımı.

Çizelge 3. Mevcutta uygulanıldığı belirtilen ilk 5 MET

Sıra	Uygulanabilirlik kodu	MET Kodu	MET Açıklaması
1	A	STM Bölüm 5.1.1.1.a	Üst düzey yönetim birimi de dâhil olmak üzere, tüm birimlerin yönetime bağlılığı
2	A	STM Bölüm 5.1.1.1.c	Gerekli prosedürler, amaçlar ve hedeflerin mali planlama ve yatırımlar ile bir arada planlanması ve belirlenmesi
3	A	STM Bölüm 5.1.1.1.b	Yönetim tarafından yürütülen işletmenin sürekli gelişimini kapsayan çevresel politikanın tanımı
4	A	STM Bölüm 5.1.2.1.e	Toprak ve su çevrelerinin kimyasal madde dökülmesi ve sızıntılarından kirlenmesinin önlenmesi
5	A	STM Bölüm 5.1.2.1.c	Yanıcı kimyasalları ve oksitleyici maddeleri ayrı ayrı depolayarak yangın riskinin azaltılması



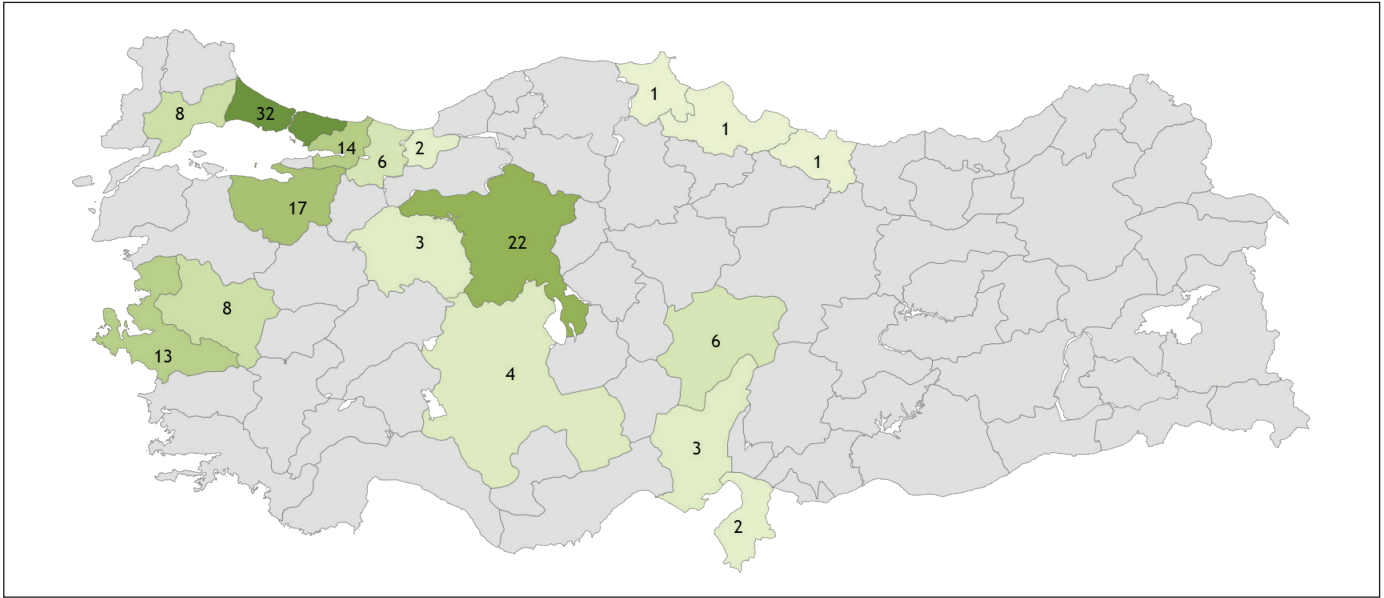
Şekil 2. Yatırım yapmadan uyum sağlayabilecek tesislerin illere göre dağılımı.



Şekil 3. İyileştirme yapılması gerektiğini bildiren tesislerin illere göre dağılımı.

Çizelge 4. Uygulanması için iyileştirme gerekli olduğu belirtilen ilk 5 MET

Sıra	Uygulanabilirlik kodu	MET Kodu	MET Açıklaması
1	B	STM Bölüm 5.1.1.1.b	Yönetim tarafından yürütülen işletmenin sürekli gelişimini kapsayan çevresel politikanın tanımı
2	B	STM Bölüm 5.1.1.1.c	Gerekli prosedürler, amaçlar ve hedeflerin mali planlama ve yatırımla ile bir arada planlanması ve belirlenmesi
3	B	STM Bölüm 5.1.1.4	En iyi tesisler ile karşılaştırma (Benchmark)
4	B	STM Bölüm 5.1.1.1.g	Daha temiz teknolojilerin gelişmesinin takibi
5	B	STM Bölüm 5.1.1.1	Çevre Yönetim Sistemi (ÇYS)



Şekil 4. Yatırım gerektiğini belirten tesislerin illere göre dağılımı.

Şekil 4, illere göre yatırım gerektiğini belirten tesislerin dağılımını göstermektedir. Türkiye genelinde 195 tesis, EKÖK'e uyum sağlayabilmek için yatırım gerektiğini belirtmiştir. Şekil 4 incelendiğinde en fazla tesisin bulunduğu İstanbul, Ankara, Bursa ve İzmir'de, sırasıyla 34, 21, 17 ve 17 adet tesis uyum sağlayabilmek için yatırım gerektiğini belirtmiştir. Çizelge 5'te uygulanması için yeni yatırımın gerekli olduğu belirtilen ilk 5 MET gösterilmektedir. MET'ler incelendiğinde MET 5.1.1, MET 5.1.5, MET 5.1.6 ve MET 5.1.8 kapsamındaki MET'lerin uygulanması için yatırım gerektiği görülmektedir. MET 5.1.1 yönetim tekniklerini kapsayan bir MET olup, mevcut durumda herhangi bir ÇYS bulunmayan tesislerin yeni bir ÇYS kurabilmesi için yatırım gerektiğini göstermektedir. Lopez-Gamero vd. EKÖK'ün uygulanabilmesi için işletmelerin öncelikle bir çevre yönetim sistemine sahip olmasının oldukça önemli olduğunu ve bunun sürdürülebilir bir kalkınma stratejisi geliştirme-

nin ilk basamağı olduğunu belirtmektedir (López-Gamero, Molina-Azorín, ve Claver-Cortés 2010). MET 5.1.5 tesis içerisinde kullanılan su ve malzemelerin minimizasyonunu gerektiren MET'tir. Kullanılan suların miktarının azaltılabilmesi için durulama aşamasında kullanılan suların belirli arıtma yöntemleri kullanılarak arıtılması ve proste yeni kullanması MET olarak önerilmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarla MET 5.1.6 ve MET 5.1.8 için uygun tekniklerin kullanılmış olacağı belirtilmektedir. Ülkemizde organize sanayi bölgelerinde faaliyet gösteren işletmeler atıksularını arıtılabilmek için organize sanayi bölgelerinde bulunan ortak arıtma tesislerini kullanmaktadırlar. Atıksu arıtma tesisine gönderilen sular arıtıldıktan sonra alıcı ortamlara deşarj edildiği için arıtılan suların tesis içerisinde yeniden kullanımı gerçekleştirilememektedir. MET'lerde belirtilen arıtma yöntemlerinin kullanılabilmesi için tesis içerisinde arıtma sistemi kurulmasının ise yatırım gerektiren bir uygulama olduğu görülmektedir.

Çizelge 7. Tesislerde uygulanabilmesi için yapısal değişiklik gerektiği belirtilen ilk 5 MET

Sıra	Uygulanabilirlik kodu	MET Kodu	MET Açıklama
1	E	STM Bölüm 5.1.5.1.b	Durulama sularının geri kazanımı (İyon değiştirme, ters ozmos, kaskat durulama)
2	E	STM Bölüm 5.1.5.2	Banyo İçine artık su taşınmasının (drag-in) azaltılması
3	E	STM Bölüm 5.2.11.a	Anodize edilmiş sızdırmazlık banyolarından gelen ısının geri kazanımı
4	E	STM Bölüm 5.1.10.c	Emisyon seviyelerini sağlamak için kullanılan teknikler
5	E	STM Bölüm 5.1.5.4.e	İlk durulama banyosunun proses banyosuna aktarımı ile malzeme geri kazanımı.

Çizelge 8. Tesislerdeki üretim yöntemi ile uyumadığı belirtilen (Tesis için geçerli değil kodlu) ilk 5 MET

Sıra	Uygulanabilirlik kodu	MET Kodu	MET Açıklaması
1	F	STM Bölüm 5.2.13.b	İç katmanların üretilmesi: Bu alan, müşteri spesifikasyonlarını yönlendiren teknolojik ilerlemeler ile hızla değişmektedir. Oksit bağlamaya alternatif teknikler gibi düşük çevresel etkilere sahip teknikleri kullanınız
2	F	STM Bölüm 5.2.13.h	Aşındırma (kalay) resistini sıyırma: Durulama sularını toplayın ve ayrı ayrı konsantre ediniz. Kalay bakımından zengin çamur çökeltiliniz ve dışarıda geri kazanım için gönderiniz
3	F	STM Bölüm 5.2.13.j	Lehim maskesinin uygulanmasından kaynaklanan hava emisyonlarını azaltmak: yüksek katılar, düşük VOC reçinelerin kullanımı
4	F	STM Bölüm 5.2.13.a	Durulama: Adımlar arasında durulama yapılırken, diğer işlemler için açıklanan çoklu durulama ve sprey tekniklerini, dışa sürüklenmeyi azaltmak için sıkma (silme) silindirlerini kullanınız
5	F	STM Bölüm 5.2.13.c	Kuru resistler (duyarlı film): Kuru resisti banyo ederken: taze film banyosu çözeltisi ile durulayarak dışarı sürüklenmeyi azaltınız, film banyosu çözeltisinin püskürtülmesini optimize ediniz, film banyosu çözeltisinin konsantrasyonlarını kontrol ediniz, ultrafiltrasyon gibi yöntemlerle, banyo edilmiş resisti akışkandan ayırınız

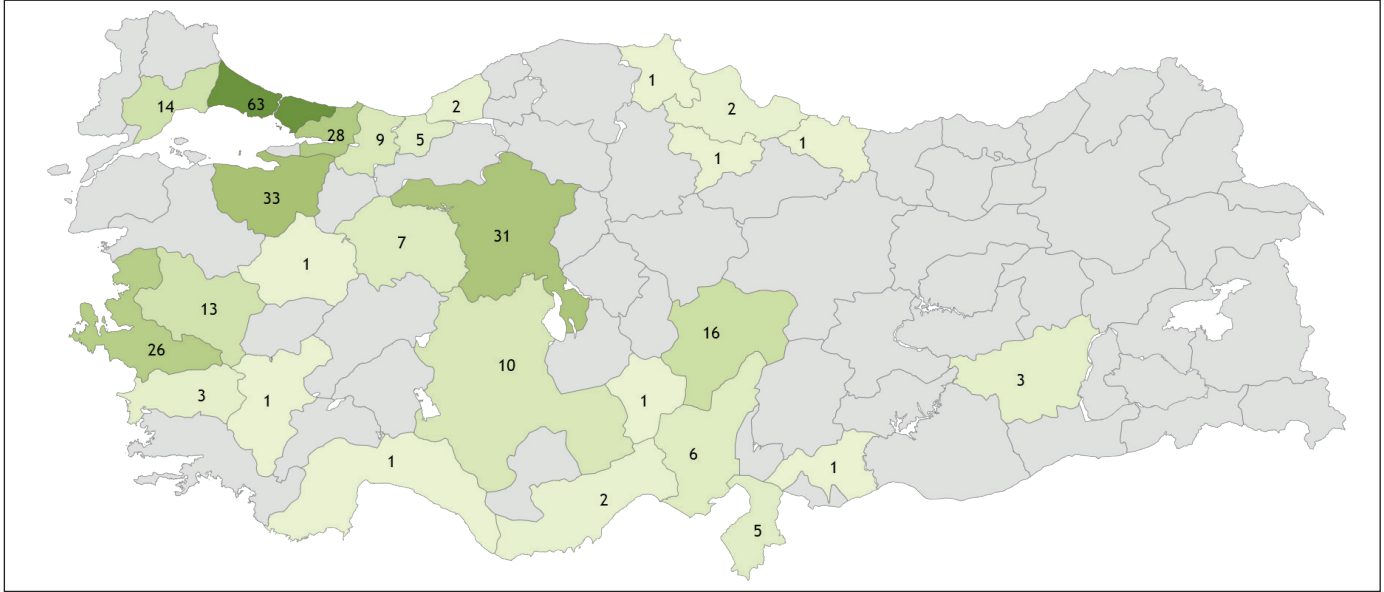
devre kartı üreticileri 96/61 / EC sayılı IPPC Direktifinin Ek 1'inci Kısım 2.6'da belirtilen 30 metreküp tekne hacmine sahip olma koşuluna uymadıkları için anket kapsamı dışında tutulmuşlardır. Bu nedenle MET 5.2.13 metallerin ve plastiklerin yüzey işlemini gerçekleştiren diğer tesislerin kapsamı dışında kalmaktadır. Şekil 7'de, Çizelge 8'de belirtilen MET'lerdeki uygulamaların tesislerdeki üretim yöntemi ile uyumadığı belirtilen tesislerin illere göre dağılımını gös-

termektedir. Yukarıda belirtilen açıklamalar doğrultusunda Şekil 1 ile Şekil 8'in oldukça benzer olduğu görülmektedir.

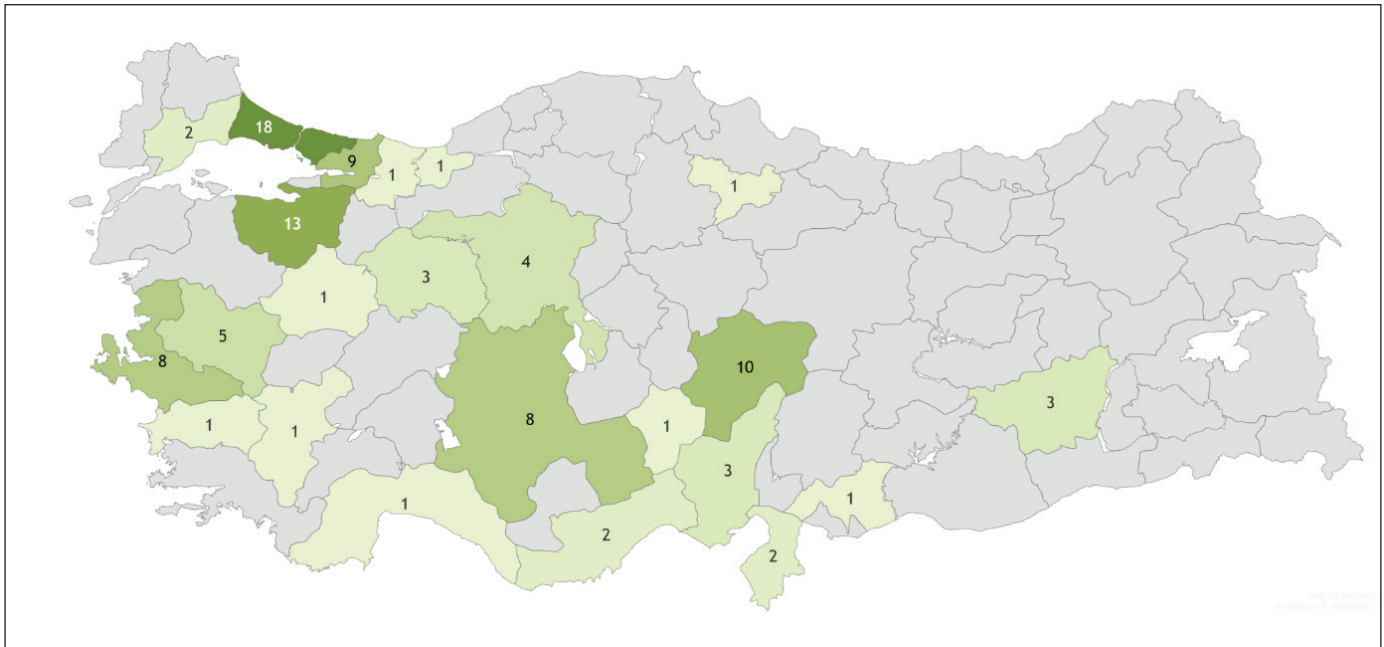
Anket soruları cevaplanırken, tesislerden verdikleri cevaplara göre MET'in uygulanabilmesi için gereken süreyi de belirtmeleri istenmiştir. Verilen cevaplara göre tesislerin EKÖK uyumluluk durumları belirlenmiştir. Şekil 8'de anket cevaplarına göre halihazırda EKÖK'e uyumlu olduğu tespit edilen tesislerin illere göre dağılımı verilmiştir. Buna göre,

en fazla EKÖK'e uyumu olan tesis sayısı 18 ile İstanbul'da bulunmaktadır. Bunu 13 tesis ile Bursa ve 10 tesis ile Kayseri izlemektedir. Anket cevaplarına göre Türkiye genelinde faaliyet gösteren kapsam içerisindeki tesislerin %34'ü EKÖK'e uyum sağlamaktadır. Hiçbir yatırıma ihtiyaç duymadan EKÖK'e uyumlu hale gelebilecek tesis sayısı 99 iken, üç ay içerisinde tesislerini gerekli düzenlemelerle hazır hale getirecek tesis sayısı 12'dir. Bu durumda ilk üç ay içerisinde

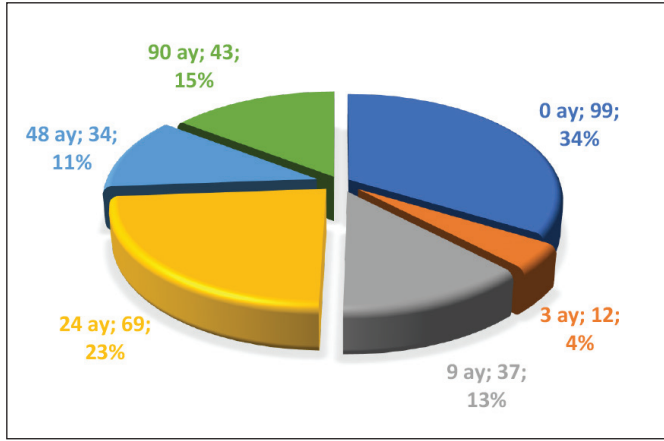
294 tesisden 111'i ilk üç ay içerisinde EKÖK'e uyumlu hale gelebilecek durumdadır. Tesislerin gerekli yatırımları 9 aylık bir süre içerisinde tamamlamaları durumunda bu sayıya 37 tesis daha eklenmekte ve toplam uyumlu hale gelebilecek tesis sayısı 148'e ulaşmaktadır. Sektörde faaliyet gösteren tesislerin %34'ü hemen, %4'ü 3 ay, %13'ü 9 ay, %23'ü 24 ay, %11'i 48 ay, %15'i ise 90 ay içerisinde EKÖK'e uyumlu hale gelebilecekleri tespit edilmiştir (Şekil 9).



Şekil 7. Tesislerdeki üretim yöntemi ile uyummadığı belirtilen tesislerin illere göre dağılımı.



Şekil 8. EKÖK'e uyumlu olduğu tespit edilen tesislerin illere göre dağılımı.



Şekil 9. Aylara göre EKÖK şartlarına uyumlu hale gelebilecek olan tesislerin dağılımı.

Yatırım süresine göre en fazla zaman ihtiyacı olan MET’ler Çizelge 9’da gösterilmektedir. Genel olarak incelendiğinde MET 5.1.1, MET 5.1.4, MET 5.1.5, MET 5.1.6, 5.1.8, MET 5.1.10 ve MET 5.2.9 en fazla yatırım süresi gerektiren MET’ler olarak tespit edilmiştir. Su ve atıksu arıtımı, suların yeniden kullanılması, malzemelerin yeniden kullanılması/geri kazanımı uygulamaları ve ÇYS’nin kurulması uygulamaları büyük ölçekli yatırımlar gerektirmesi nedeniyle süre olarak da en uzun süre ihtiyacı olan MET’ler olarak görülmektedir.

Benzer çalışmalar AB üye ülkelerinde de gerçekleştirilmiş olup yapılan çalışmalarda hem EKÖK’ün uygulanabilirliği hem de gereklilikleri tartışılmıştır. Kovacs vd. yaptıkları çalışmada Romanya’da faaliyet gösteren bir yüzey işleme tesisini incelemişler ve suya verilen emisyonların azaltılabilmesi için MET’lerin uygulanmasının önemini araştırmışlardır. İncelenen tesiste su geri kazanımı yapılmadığı ve durulama tanklarında ortaya çıkan atıksuyun kısmi bir arıtmadan sonra tesis yakınında bulunan Mures nehrine deşarj edildiği belirtilmiştir. MET 5.1.8.4.’te belirtildiği gibi sıfır deşarj tekniklerinin kullanılmasının hem su tüketimini hem de alıcı ortam kalitesini iyileştireceğini belirtmişlerdir (Kovacs vd. 2019). Barros vd. İspanya’nın Galiçya bölgesinde yaptıkları çalışmada yüzey işleme endüstrisinde ortaya çıkan kirliliği önleme ve/veya azaltma seçeneklerini değerlendirmişler ve uygulanan işlemler ve bunların çevresel boyutları analiz edilerek genel bir sektör değerlendirmesi yapmışlar-

dır. Değerlendirme neticesinde Galiçya bölgesinde halihazırda sadece üç adet tesisin hazır olduğunu altı adet tesisin ise uygulamaları hayata geçirdikleri taktirde hazır hale gelebilecekleri belirtilmiştir (Barros vd. 2008). Gartiser vd. metal yüzey işlemleri faaliyeti gösteren bir işletmede MET uyumluluğunun sağlanabilmesi amacıyla işletmeden ortaya çıkan atıksuların değerlendirilebilmesini incelemek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda elektrokaplama yapılan bir tesisten ortaya çıkan atıksuların kirlilik yükünün oldukça fazla olduğu ve MET’lerde belirtilen yöntemler kullanılarak kirlilik yükünün düşürülebileceği ve su kullanımının en aza indirilebileceği belirtilmiştir (Gartiser vd. 2010).

3. Sonuç ve Değerlendirme

Gerçekleştirilen çalışmada ülkemizde “Metallerin ve Plastiklerin Yüzey İşlemi (STM)” sektöründe faaliyet gösteren tesislerin, Referans Belgesi (BREF), 96/61 / EC sayılı Konsey Direktifinin (IPPC Direktifi) 16 (2) Maddesi uyarınca hazırlanan Mevcut En İyi Teknikler (MET) kapsamında hazırlanan anketlere verdikleri cevaplar değerlendirilmiştir. Anket sonuçlarına göre Türkiye genelinde değerlendirmeler yapılarak MET’lere göre il bazlı dağılımlar incelenmiştir. Değerlendirmeye sadece direktifte belirtilen, 30 metreküp tekne hacmine sahip olan tesisler dahil edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre kapsam dahilinde 294 tesis olduğu tespit edilmiştir. Metallerin ve plastiklerin yüzey işlemleri sektöründe faaliyet gösteren tesis sayısı en fazla İstanbul’da (63 tesis) bulunmaktadır. Kapsam içerisinde bulunan tesislerden 99 tanesinin, EKÖK için halihazırda tam uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Tesislerin genellikle, atıksuların arıtılması, atıksuların tesis içerisinde yeniden kullanılması, atıksu içerisinde bulunan değerli maddelerin geri kazanımı/yeniden kullanılması, yeni bir ÇYS kurulması ve uygulanmaya başlaması ile ilgili MET’lerin uygulanmasında zorluk çektikleri belirlenmiştir. Bunun yanında, ihracat yapan firmaların çevre ve temiz üretim konusunda oldukça hassas oldukları ve MET’lere uyum konusunda zorluk çekmedikleri görülmüştür. Tesislerin EKÖK’e uyumlu hale gelebilmeleri için %6.1’inin 3 ay, %19’unun 9 ay, %35.4’ünün 24 ay, %17.5’inin 48 ay ve geri kalan %22 tesisin ise 90 ay süreye ihtiyaçları olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 9. Yatırım süresi en uzun olan 15 MET

Sıra	Yatırım süresine göre en çok süre gerektiren MET ler	MET Açıklama
1	STM Bölüm 5.1.6.4.b	Atık sulardan metallerin geri kazanımı ve/veya geri dönüşümü.
2	STM Bölüm 5.1.6.2	Dışarı atılan muhtevadaki Metali anot malzemesi olarak geri kazanmak MET'dir. Bu, su kullanımının azaltılmasına ve daha fazla durulama aşaması için su geri kazanımına çok yardımcı olabilir.
3	STM Bölüm 5.1.6.1.a	Metallerin ve diğer hammaddelerle birlikte kaybının önlenmesi MET'dir. Banyo dışına sürüklenen muhtevanın miktarı geri kazanım yöntemleri ile azaltılmalıdır.
4	STM Bölüm 5.1.1.1.g	Daha temiz teknolojilerin gelişmesinin takibi;
5	STM Bölüm 5.1.6.4.c	Alüminyum yüze işlemlerinde ortaya çıkan alüminyum hidroksit süspansiyonunun atık su arıtma tesislerindeki son atıklardan fosfatın çöktürülmesi için kullanılması gibi, kalitenin ve miktarın izin verdiği yerlerde malzemelerin harici olarak yeniden kullanılması
6	STM Bölüm 5.1.6.4.a	Geri kazanımı veya yeniden kullanımı kolaylaştırmak için atıklar ve atık suları proses aşamasında veya atık su arıtımında ayrıştırmak
7	STM Bölüm 5.1.5.4.c	Durulamada atılan su miktarının 3-20 litre/m ² /durulama aralığında sınırlandırılması
8	STM Bölüm 5.1.5.4.b	Çoklu durulamanın etkinliğini artırmak için Eko-Durulama uygulaması.
9	STM Bölüm 5.1.5.1.b	Durulama sularının geri kazanımı (İyon değiştirme, ters ozmos, Kaskat durulama)
10	STM Bölüm 5.1.5.1.a	Su ve malzeme kullanımının, tesisin tüm noktalarında düzenli aralıklarla izlenmesi ve referans değerlere göre karşılaştırılması.
11	STM Bölüm 5.1.4.3.a	Isı geri kazanım fırsatlarının araştırılması
12	STM Bölüm 5.1.10.a	Çekilen (ekstraksiyon) havanın sınırlandırılması
13	STM Bölüm 5.2.9	Asitleme (asitle yıkama) (dekapaj) için asit tüketiminin yüksek olduğu durumlarda, belirtilen tekniklerden biri kullanılarak asit ömrünü uzatmak veya bazı organik bileşikler oksitlemek ve metal-bağları uzaklaştırmak için elektroliz kullanarak elektrolitik asitleme asitlerinin ömrünü uzatmak MET'dir. Asitleme ve diğer güçlü asitler de dışarıda yeniden kullanılabilir veya toplanabilir.
14	STM Bölüm 5.1.8.4	Sıfır deşarj teknikleri
15	STM Bölüm 5.1.5.4.d	Sprey tekniklerinin uygulanması

4. Kaynaklar

Avrupa Komisyonu (AB) (2008). Avrupa Birliği Resmi Gazetesi, 15 Ocak 2008 tarih ve 2008/1/EC sayılı Entegre Kirliliği Önleme ve Kontrol konulu konsey direktifi. Brüksel. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0001>. 25.05.2022.

Barros, M.C., Torres. M.T., Bello P.M. 2008. Integrated pollution prevention and control in the surface treatment industries in Galicia (NW Spain). *Clean Technologies and Environmental Policy* 10(2): 175-188.

Çavuşoğlu, B., Ekmekyapar, F. 2019. "Mevcut en iyi teknikler (MET) kapsamında tekstil endüstrisinde kostik geri kazanımının değerlendirilmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences* 2 (1): 6-10.

Environment Agency. 2004. Consultation Draft - Guidance for the Surface Treatment of Metals and Plastics by Electrolytic and Chemical Processes. Bristol. www.environment-agency.gov.uk. 26.04.2022

- Gartiser, S., Hafner, C., Hercher, C., Kronenberger-Schäfer, K., Paschke, A. 2010.** Whole effluent assessment of industrial wastewater for determination of BAT compliance. Part 2: Metal surface treatment industry. *Environmental Science and Pollution Research* 17(5): 1149–1157.
- Honkasalo, N., Rodhe, H., Dalhammar, C. 2005.** Environmental permitting as a driver for eco-efficiency in the dairy industry: A closer look at the IPPC directive. *Journal of Cleaner Production* 13(10–11): 1049–1060.
- Karström, K., Noreng, J., Gidlund, J., Lundström, J., Amanda, H., Cederberg-Krohn, B., Skinnari, V. 2020.** Surface Treatment Industry in the Nordic Countries Overview and BAT Examples Nordic Publications, Copenhagen.
- Kocabas, A.M., Yukseler, H., Dilek, F.B., Yetis, U. 2009.** Adoption of European Union’s IPPC directive to a textile mill: Analysis of water and energy consumption. *Journal of Environmental Management* 91(1): 102–113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.07.012>.
- Kovacs, M., Calamar A.N., Toth, L., Simion, S. Simion A. 2019.** Verifying compliance of a metallic surface treatment company with bat requirements, to minimize emissions of pollutants in water. International symposium “The Environment and The Industry”. SIMI 2019, s. 285–292.
- López-Gamero, M. D., Molina-Azorín, J. F., Claver-Cortés, E. 2010.** The potential of environmental regulation to change managerial perception, environmental management, competitiveness and financial performance. *Journal of Cleaner Production* 18(10–11): 963–974.
- Nakonieczny, A., M. Kieszkowski. 2006.** Toward cleaner production technologies in surface treatment of metals. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 92: 57–64.
- Santonja, G.G., Karlis, P. 2020.** Developing EU environmental standards for the food, drink and milk industries: key environmental issues and data collection. *Environmental Sciences Europe* 32(1): 1–26.
- Silvo, K., Jouttijärvi, T., Melanen, M. 2009.** Implications of regulation based on the IPPC directive - a review on the finnish pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production* 17(8): 713–723. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.011>.
- Vázquez, V.L., Rodrigues, G., Daddi, T., Giacomo, M.R.D., polders, C., Dils, E. 2015.** Policy challenges in transferring the integrated pollution prevention and control approach to southern mediterranean countries: A case study. *Journal of Cleaner Production* 107: 486–97.



Bor Karbür (B_4C) Katkılı Epoksi Esaslı Nanokompozitlerin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Seçimi

Selection of Boron Carbide (B_4C) Doped Epoxy Based Nanocomposites by Multi-Criteria Decision Making Methods

Batuhan Özakin^{1*} , Kürşat Gültekin² , İlhan Çelik³ 

¹Samsun Üniversitesi, Kavak Meslek Yüksekokulu, Samsun, Türkiye

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

³Samsun Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

Öz

Ürün tasarlama ve geliştirilmesinde malzeme seçimi çok önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca kullanıcıların yüksek performans ve sürdürülebilirlik elde etmesi için doğru malzemenin seçimi büyük önem taşımaktadır. Ürün geliştirmede maksimum performansı ve minimum maliyeti sağlayan optimum malzemeyi seçmek gerekmektedir. Optimum malzemeyi seçmek için son zamanlarda çok kriterli karar verme yöntemleri tercih edilen yöntemler haline gelmiştir. Bu yöntemler sorunları küçük parçalara ayırarak analizler gerçekleştirip ardından parçaları bir araya getirip soruna etkili çözüm sunmaktadırlar. Bu çalışmada, epoksi esaslı reçineye ağırlıkça farklı oranlarda (%0.5, %1, %2, %3, %4, %5) hegzagonal bor karbür (B_4C) nanoparçacıkları eklenerek elde edilen nanokompozitlerin; çekme mukavemeti, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü, camı geçiş sıcaklığı (T_g), çapraz bağ yoğunluğu, tokluk ve fiyat özellikleri kullanılarak MOORA (oran analizine dayalı çok amaçlı optimizasyon) ve TOPSIS (ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralaması tekniği) çok kriterli karar verme yöntemleriyle malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. MOORA ve TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemleriyle yapılan malzeme seçimlerinde ilk sırayı her iki yöntemde de ağırlıkça %2 oranında B_4C katkılı epoksi nanokompozitin optimum malzeme olarak tercih edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nanokompozitler, Malzeme seçimi, Çok kriterli karar verme yöntemleri, MOORA, TOPSIS

Abstract


Material selection plays a very important role in product design and development. In addition, the selection of the right material is of great importance for users to achieve high performance and sustainability. In product development, it is necessary to choose the optimum material that provides maximum performance and minimum cost. Recently, multi-criteria decision making methods have become the preferred methods to select the optimum material. These methods analyze the problems by breaking them into small parts, then put the parts together and offer an effective solution to the problem. In this study, nanocomposites obtained by adding hexagonal boron carbide (B_4C) nanoparticles in different weight ratios (0.5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%) to the epoxy-based resin; Material selection was carried out by using MOORA (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis) and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity) multi-criteria decision making methods by using tensile strength, strain ability, storage modulus, glass transition temperature (T_g), crosslink density, toughness and price properties. It was concluded that 2% by weight B_4C added epoxy nanocomposite should be preferred as the optimum material in the material selections made by MOORA and TOPSIS multi-criteria decision making methods.

Keywords: Nanocomposites, Material selection, Multi-criteria decision making methods, MOORA, TOPSIS

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: batuhan.ozakin@samsun.edu.tr

Batuhan Özakin  orcid.org/0000-0003-1754-949X

Kürşat Gültekin  orcid.org/0000-0002-6790-6822

İlhan Çelik  orcid.org/0000-0001-6757-834X



1. Giriş

Tasarım sürecinin en önemli faaliyetlerden biri olan malzeme seçimi, 20 yılı aşkın süredir araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Uygun olmayan bir malzeme seçilmesi durumunda tasarım hasara uğrayarak performansı önemli ölçüde azaltmaktadır. Optimum malzemeyi seçmek için geleneksel olarak bilinen en düşük fiyatın etkili bir yaklaşım olmayabileceği tespit edildiğinden dolayı çok kriterli karar verme yöntemleri malzeme seçimi alanında son zamanlarda popüler uygulamalardan biri haline gelmiştir. Çok kriterli karar verme yöntemleri genel olarak alternatifler üretme, kriterler oluşturma, alternatiflerin değerlendirilmesi, kriter ağırlıklarının değerlendirilerek bir sıralama sisteminin uygulanmasından oluşmaktadır (Edwards 2005, Deng ve Edwards 2007, Jahan vd. 2011, Doumpos ve Zopounidis 2002, Rahim vd. 2020). Bu yöntemlerde karmaşık problemler küçük parçalara ayrılarak analizler yapıldıktan sonra, tüm parçalar bir araya getirilerek problemin tam görüntüsü meydana getirilmektedir (Ghaleb vd. 2020). Çok kriterli karar verme yöntemleri için geliştirilmiş teknikler arasında her tekniğin kendine özgü analiz modelleri, bilgi gereksinimleri, temel varsayımları ve kararları bulunmaktadır (Aruldoss vd. 2013). Literatürde araştırmacılar tarafından çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak malzeme seçimi yapılan birçok çalışma yer almaktadır. Athawale ve Chakraborty (2012), malzeme seçimi için en sık kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinin sıralama performansını incelemişler ve VIKOR (çoklu kriter uzlaşma sıralaması) yönteminin hesaplama basitliği nedeniyle daha iyi bir performansa sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Karande vd. (2016) yaptıkları bir çalışmada, popüler olarak kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerini endüstriyel robot seçim problemine uygulamışlardır. MOORA (oran analizine dayalı çok amaçlı optimizasyon) yönteminin çarpımsal formunun en önemli ve kritik kriterlerinin değişen ağırlıklarından en az etkilenen ve en çarpıcı yöntem olduğunu tespit etmişlerdir. Patnaik vd. (2009), yapısal uygulamalarda malzeme seçimi için AHP (analitik hiyerarşi prosesi) ve TOPSIS (ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralaması tekniği) yöntemlerini kullanmışlardır. Sıralamayı kompozit malzemelerin yoğunluk, sertlik, çekme, eğilme, aşınma oranı ve darbe dayanımı özelliklerine göre belirlemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda 400 gsm, %30 viskoz hasır kumaş takviyeli ve %15 yüksek fırın cürufu parçacık dolgulu epoksi kompozitlerinin en iyi sonucu verdiğini tespit etmişlerdir. Raju vd. (2020), alüminyum-hindistan cevizi kabuğu külü (CSA) kompozitlerinin en iyi oranını belirlemek için TOPSIS, AHP ve MOORA yöntemlerini entegre ederek sıralama çalışması yapmışlar-

dır. Al-1100 matrisi içerisine hacimce %5, %10, %15 ve %20 oranlarında CSA katkılı kompozitleri döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin yoğunluk, sertlik, çekme mukavemeti, tokluk, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı gibi özelliklerini kriter olarak ele almışlardır. Yapılan analizler sonucunda, %15 oranında CSA katkılı kompoziti en iyi malzeme olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, en zayıf performans gösteren malzeme olarak ise katkısız kompozitin olduğunu ifade etmişlerdir. Singh vd. (2021), çekme mukavemeti, sertlik, yoğunluk ve maliyet gibi parametreler ile çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanarak alüminyum hibrit metal matris kompozitlerin seçilmesini AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak optimize etmişlerdir. Analizler sonucunda ise AA5083'ün tüm alüminyum hibrit metal matrisli kompozitler arasında istenilen özelliği elde etmek için en uygun matris malzemesi olduğunu belirtmişlerdir. Bhadra ve Dhar (2022), havacılık ve uzay araçlarında kabin içi uygulamalarında kullanılan on iki farklı doğal elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler arasından en iyi doğal elyafı belirlemek için bulanık AHP, TOPSIS, EDAS (ortalama çözüm) ve COPRAS (karmaşık oransal değerlendirme) yöntemlerini kullanmışlardır. Ayrıca, bu çok kriterli karar verme yöntemlerinin hassasiyetini değerlendirmeye çalışmışlardır. Kullanılan on iki alternatif arasında Bagas elyafının en uygun olduğunu ve ayrıca EDAS yönteminin diğer yöntemlere göre daha hassas olduğunu tespit etmişlerdir. Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde, çok kriterli karar verme yöntemlerinin malzeme seçiminde önemli bir rol teşkil ettiği ve aynı zamanda optimum malzemenin seçiminde uygun olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışmada, daha önce deneysel olarak epoksi esaslı reçineye ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında hegzagonal bor karbür (B₄C) nanoparçacıkları eklenerek üretilen nanokompozitlerin (Gültekin vd. 2021); çekme mukavemeti, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı (T_g), çapraz bağ yoğunluğu, tokluk ve fiyat özellikleri kullanılarak MOORA ve TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemleriyle malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir.

2. Malzemeler ve Malzeme Seçim Yöntemleri

2.1. Malzeme

Daha önce yapılan deneysel çalışmada (Gültekin vd. 2021), iki bileşenli MGS-LR285 epoksi reçine içerisine hegzagonal bor karbür (B₄C) nanoparçacıkları ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında ilave edilmiş ve homojen dağılım sergilemesi için ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır.

Epoksi esaslı reçineye B₄C nanoparçacıkları ilave edilerek üretilen nanokompozitlerin; çekme mukavemeti, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı, çapraz bağ yoğunluğu, tokluk özellikleri önceki çalışmada belirlenmiştir. Nanokompozit malzemelerin üretimi ve testleri ile ilgili bilgiler bahsedilen çalışmada detaylı bir şekilde anlatılmıştır (Gültekin vd. 2021). Üretilen nanokompozit malzemelerin maliyeti ise aynı ağırlıkta kullanılan reçine ve nanoparçacıkların katkı oranları referans alınarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan B₄C katkıli nanokompozit malzemeler ve özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir. Çalışmada kriter olarak seçilen bu özellikler polimer kompozit malzemelerin seçiminde sıklıkla dikkate alınan kriterlerdir. Bu kriterlerden çekme dayanımı, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü ve statik tokluk değerleri nanokompozit malzemenin seçiminde yüksek değerde olması istenen mekanik özelliklerdir. Bununla birlikte camsı geçiş sıcaklığı ve çapraz bağ yoğunluğu özellikleri ise polimer nanokompozit malzeme seçiminde yüksek değer alması istenen en önemli termal ve yapısal özelliklere ait kriterlerdir. Fiyat kriteri ise tüketicinin en çok kayda değer saydığı polimer nanokompozit malzeme seçiminde düşük değerde olması istenen ekonomik özelliklerindedir.

2.2. Malzeme Seçim Yöntemleri

2.2.1. MOORA Yöntemi

MOORA yöntemi, Brauers ve Zavadskas (2016) tarafından geliştirilmiş ve son zamanlarda sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerindedir. Bu yöntemde kriterler arasındaki etkileşimler bir bütün olarak ele alınır ve ağırlıklı değerler ile malzeme seçimi gerçekleştirilir. MOORA yönteminde birçok yaklaşım bulunmaktadır. En çok kullanılanı

ise MOORA oran yaklaşımıdır. Bu yaklaşımın aşamaları aşağıda belirtildiği gibidir (Chakraborty 2011).

Aşama 1: Karar matrisi (K) oluşturulur. Bu matris Çizelge 1'de belirlenen kriterlerden elde edilir.

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \vdots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Aşama 2: Karar matrisi (K) normalize edilir. Normalize karar matrisi (N), Denklem (2) yardımıyla oluşturulur ve seçilen kriterlerdeki maksimum ya da minimum amaç irdelenmez.

$$k_{ij}^* = \frac{k_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n k_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

Aşama 3: Karar kriterlerinin performansı (X); maksimizasyon amaçlı performans değerleri toplamından minimizasyon amaçlı performans değerleri toplamı çıkarılarak Denklem (3) yardımıyla belirlenir.

$$X = \sum_{j=1}^t k_{ij}^* - \sum_{j=t+1}^n k_{ij}^* \quad (3)$$

Aşama 4: Elde edilen karar kriterlerinin performans (X) değerleri sıralanır. Sıralama sonucunda en yüksek değeri alan malzemenin ilk sırada seçimi yoluna gidilir.

2.2.2. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS yöntemi, Hwang ve Yoon (1981) tarafından geliştirilmiş ve birçok uygulamada kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerindedir. Alternatif karar kriterlerinin

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan B₄C katkıli nanokompozit malzemeler ve özellikleri (Gültekin vd. 2021)

B ₄ C katkı oranı (%)	Nanokompozit malzeme	Çekme dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme kabiliyeti (mm/mm)	Depolama modülü (MPa)	Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	Çapraz bağ yoğunluğu (mol/m ³)	Statik tokluk (MPa)	Fiyat (USD)
0	BC0	60.70	0.072	2290	69.20	2822	2.57	1.00
0.5	BC05	70.80	0.081	2597	70.50	2987	3.59	1.34
1	BC1	78.80	0.088	3154	72.90	3487	4.42	1.68
2	BC2	82.05	0.091	3304	73.80	3767	5.21	2.36
3	BC3	78.09	0.062	2778	71.10	3168	3.07	3.05
4	BC4	58.30	0.054	2545	69.80	3016	1.84	3.73
5	BC5	51.04	0.048	2332	68.00	2950	1.42	4.41

değerlendirilmesi pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm olmak üzere iki temel yaklaşıma dayanır. TOPSIS yöntemi en iyi alternatifin pozitif ideal çözümden en kısa ve negatif ideal çözümden en uzak mesafeye sahip olması gerektiği fikrini esas almaktadır (Dymova vd. 2013). Bu yaklaşımın aşamaları aşağıda belirtildiği gibidir (Sarkar 2014).

Aşama 1: Karar matrisi (K) oluşturulur. Bu matris Çizelge 1’de belirlenen kriterlerden elde edilir.

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \vdots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Aşama 2: Karar matrisi (K) normalize edilir. Normalize karar matrisi (N), Denklem (5) yardımıyla oluşturulur.

$$k_{ij}^* = \frac{k_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n k_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

Aşama 3: Ağırlıklı standart karar matrisi (A) oluşturulur. Bu matris, değerlendirme ölçütlerine ilişkin ağırlık değerleri kriterlerinin önem derecesine göre belirlenir. Normalize karar matrisinin elemanları belirlenen ağırlık değerleri ile çarpılır ve ağırlıklı standart karar matrisi oluşturulur.

Aşama 4: Pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri elde edilir. Pozitif ideal çözüm A matrisinin sütunlarının en büyük değerleri, negatif ideal çözüm ise A matrisinin en küçük değerleridir. Pozitif ideal çözüm kümesi, $A^+ = \{a_1^+, a_2^+, \dots, a_m^+\}$ ve negatif ideal çözüm kümesi ise $A^- = \{a_1^-, a_2^-, \dots, a_m^-\}$ şeklinde tanımlanır.

Aşama 5: Pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklık değerleri, Denklem (6) ve (7) yardımıyla belirlenir ve karar seçeneği sayısı kadar uzaklık değeri hesaplanır.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (a_{ij} - a_j^+)^2} \quad (6)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (a_{ij} - a_j^-)^2} \quad (7)$$

Aşama 6: Her bir karar seçeneğinin ideal çözüme göreli yakınlık katsayıları, Denklem (8) yardımıyla hesaplanır. Pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerinden uzaklıklar bulunur.

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (8)$$

Aşama 7: Elde edilen yakınlık katsayıları, $0 \leq C_i < 1$ aralığındadır. Belirlenen yakınlık katsayılarından büyük olan değerlere göre sıralama yapılarak seçim işlemi gerçekleştirilir.

3. Analiz ve Bulgular

Malzeme seçimi için MOORA oran yaklaşımında ele alınan karar matrisi Çizelge 1’de verilmiştir. Bu değerler Denklem (2) yardımıyla normalize değerlerine dönüştürülmüştür. Normalize edilmiş karar matrisine ait değerler Çizelge 2’de verilmiştir.

Karar kriterlerinin performansı değerlendirilirken çekme dayanımı, çekme şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı, çapraz bağ yoğunluğu ve statik tokluk kriterlerinin maksimum olması istenir. Aynı zaman-

Çizelge 2. Normalize edilmiş karar matrisine ait değerler

Nanokompozit malzeme	Çekme dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme kabiliyeti (mm/mm)	Depolama modülü (MPa)	Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	Çapraz bağ yoğunluğu (mol/m ³)	Statik tokluk (MPa)	Fiyat (USD)
BC0	0.330	0.375	0.316	0.370	0.335	0.286	0.136
BC05	0.385	0.422	0.359	0.376	0.354	0.399	0.183
BC1	0.429	0.459	0.435	0.389	0.414	0.491	0.229
BC2	0.447	0.474	0.456	0.394	0.447	0.579	0.322
BC3	0.425	0.323	0.384	0.380	0.376	0.341	0.416
BC4	0.317	0.281	0.351	0.373	0.358	0.204	0.508
BC5	0.278	0.250	0.322	0.363	0.350	0.158	0.601

Çizelge 3. MOORA oran yaklaşımıyla elde edilen malzeme seçimi sıralaması

	BC0	BC05	BC1	BC2	BC3	BC4	BC5
X	1.876	2.112	2.388	2.475	1.813	1.376	1.120
Sıralama	4	3	2	1	5	6	7

Çizelge 4. Ağırlıklı standart karar matrisine ait değerler

Nanokompozit malzeme	Çekme dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme kabiliyeti (mm/mm)	Depolama modülü (MPa)	Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	Çapraz bağ yoğunluğu (mol/m ³)	Statik tokluk (MPa)	Fiyat (USD)
BC0	0.047	0.054	0.045	0.053	0.048	0.041	0.019
BC05	0.055	0.060	0.051	0.054	0.051	0.057	0.026
BC1	0.061	0.066	0.062	0.056	0.059	0.070	0.033
BC2	0.064	0.068	0.065	0.056	0.064	0.083	0.046
BC3	0.061	0.046	0.055	0.054	0.054	0.049	0.059
BC4	0.045	0.040	0.050	0.053	0.051	0.029	0.073
BC5	0.040	0.036	0.046	0.052	0.050	0.023	0.086

da fiyat kriterinin ise minimum olması beklenir. Denklem (3)'de her malzeme için yerine konulduğunda karar kriterlerinin performansı değerleri (X) elde edilmiştir. Karar kriterlerinin performansı değerleri sıralanmış ve malzeme seçimine ait sıralama elde edilmiştir. Çizelge 3'de MOORA oran yaklaşımıyla elde edilen malzeme seçimi sıralaması verilmiştir.

Malzeme seçimi için TOPSIS yaklaşımında ele alınan karar matrisi Çizelge 1'de verilmiştir. Bu değerler Denklem (5) yardımıyla normalize değerlerine dönüştürülmüştür. Normalize edilmiş karar matrisine ait değerler Çizelge 2'de verilmiştir. Ağırlıklı standart karar matrisi oluşturulurken çekme mukavemeti, şekil değiştirme, depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı, çapraz bağ yoğunluğu, tokluk ve fiyat özelliklerinin önem derecesi eşit olarak kabul edilmiş ve ağırlıklı standart karar matrisi elde edilmiştir (Çalışkan vd. 2012). Belirlenen önem dereceleri ile normalize karar matrisinin çarpılması sonucunda elde edilen ağırlıklı standart karar matrisine ait değerler Çizelge 4'de sunulmuştur.

Ağırlıklı standart karar matrisinde elde edilen değerlerden en düşük olanlar negatif ideal çözüm kümesini ve en yüksek olanlar ise pozitif ideal çözüm kümesi değerleri belirlenmiştir. Çizelge 4'de elde edilen ağırlıklı standart karar matrisinin değerlerinden pozitif ideal çözüm kümesi, $A^+ = \{0.064, 0.068, 0.065, 0.056, 0.064, 0.083, 0.086\}$ olarak

Çizelge 5. Pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklık değerleri

Nanokompozit malzeme	S_i^+	S_i^-
BC0	0.086	0.026
BC05	0.069	0.045
BC1	0.055	0.060
BC2	0.040	0.073
BC3	0.051	0.077
BC4	0.068	0.061
BC5	0.076	0.067

elde edilmiştir. Benzer şekilde negatif ideal çözüm kümesi ise $A^- = \{0.040, 0.036, 0.045, 0.052, 0.048, 0.023, 0.019\}$ olarak belirlenmiştir.

TOPSIS yönteminin beşinci aşamasında pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklık değerleri (S_i^+, S_i^-) Denklem (6) ve (7) yardımıyla hesaplanmıştır. Denklemler yardımıyla hesaplanan pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklık değerleri Çizelge 5'de verilmiştir.

TOPSIS yönteminin altıncı aşamasında her bir karar seçeneğinin ideal çözüme göreli yakınlık katsayıları ise Denklem (8) yardımıyla hesaplanmıştır. Yöntemin yedinci ve son aşamasında yakınlık katsayılarından büyük olan değerlere

göre sıralama yapılarak seçim işlemi gerçekleştirilmiştir. Karar seçeneklerinden ideal çözüme göre hesaplanan yakınlık katsayıları ve malzeme seçim sıralamaları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Karar seçeneklerinden ideal çözüme göre hesaplanan yakınlık katsayıları ve malzeme seçim sıralamaları

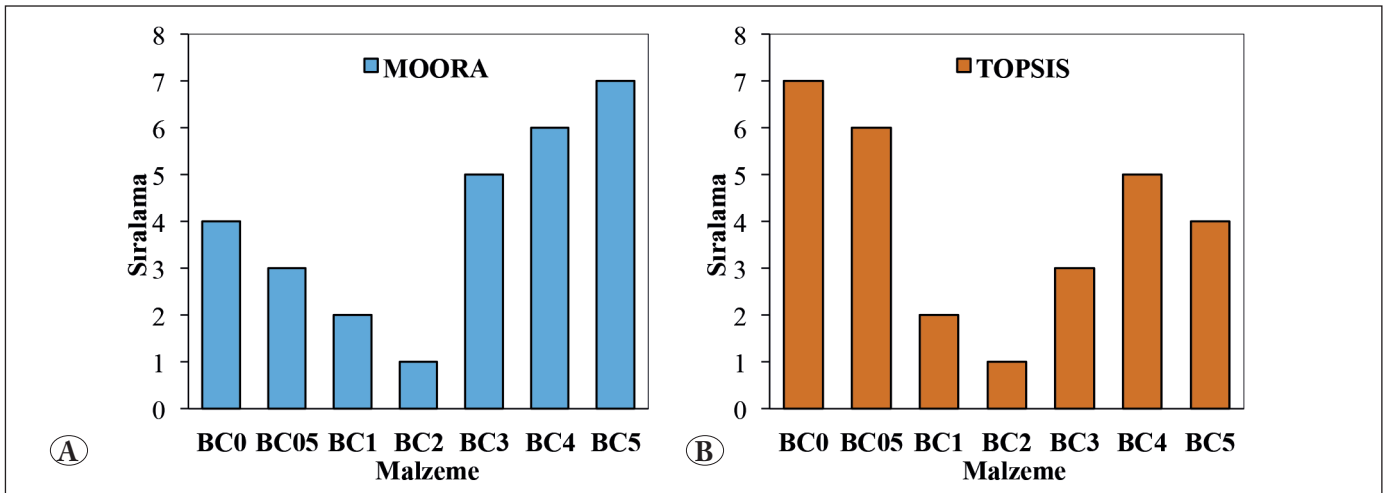
Nanokompozit malzeme	C _i	Sıralama
BC0	0.232	7
BC05	0.395	6
BC1	0.542	2
BC2	0.669	1
BC3	0.514	3
BC4	0.447	5
BC5	0.467	4

Çok kriterli karar verme yöntemleriyle yapılan malzeme seçim işlemleri analizi sonucunda, MOORA yönteminden elde edilen sıralamalar Şekil 1(A)'da ve TOPSIS yöntemiyle elde edilen sıralamalar ise Şekil 1(B)'de görülmektedir. Birinci sırada yer alan malzemeye bakıldığında her iki yöntemde de ağırlıkça %2 B₄C nanoparçacık katkılı epoksi nanokompozitin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca her iki yöntemde de ikinci sırayı ağırlıkça %1 oranında B₄C nanoparçacıkları katkılı epoksi esaslı nanokompozit malzemenin aldığı görülmüştür. Üçüncü sırayı MOORA oran yaklaşımında ağırlıkça %0.5 oranında B₄C katkılı epoksi esaslı nanokompozit alırken, TOPSIS yönteminde ise %3 oranında B₄C katkılı epoksi esaslı nanokompozitin aldığı gözlemlenmiştir. Seçilen malzemeler içerisinde son sıraya bakılacak olursa MOORA oran yaklaşımında ağırlık-

ça %5 oranında nanoparçacık katkılı nanokompozitin aldığı gözlemlenirken, TOPSIS yönteminde ise son sırada katkısız epoksi kompozitin yer aldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçların yer aldığı çalışma ile birlikte değerlendirildiğinde her iki çalışmanın da birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir (Gültekin vd. 2021). Grafiklerde üçüncü sıra ve sonraki seçim sıralamalarında iki yöntem kıyaslandığında farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar tercih edilen yöntemlerin matematiksel süreçlerindeki farklılıklardan oluşmaktadır. TOPSIS yöntemi literatürde en çok tercih edilen çok kriterli karar verme yöntemi olup kriterlerin ağırlık katsayıları seçim sıralamalarına büyük oranda etki etmektedir. Bu çalışmada TOPSIS yönteminde her kriter için ağırlık katsayıları eşit oranlı olarak değerlendirilmiş ve seçim sıralamaları belirlenmiştir. MOORA yöntemi ise yine sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biri olup kriterler için ağırlık katsayılarını hesaba katmadan seçim sıralamalarına ulaşan çok kriterli karar verme yöntemlerindedir. Dolayısıyla belirtilen bu farklılıkların seçim sıralamalarını etkilediği görülmektedir. Uygulamada ilk sırayı alan alternatif seçenekler ön planda olduğundan her iki yaklaşımın oldukça güvenilir sonuçlar verdiği söylenebilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada daha önce deneysel olarak epoksi esaslı reçineye ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında hegzagonal bor karbür (B₄C) nanoparçacıkları eklenerek elde edilen nanokompozitlerin; seçim sürecinde sıklıkla dikkate alınan mekanik özelliklerden çekme dayanımı, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü ve statik tokluk, yapısal ve termal özelliklerden camsı geçiş sıcaklığı ve çapraz bağ



Şekil 1. Çok kriterli karar verme yöntemleriyle yapılan malzeme seçimlerinden elde edilen sıralamalar A) MOORA yöntemi, B) TOPSIS yöntemi.

yoğunluğu ile tüketicinin en önem verdiği fiyat kriterlerine göre MOORA ve TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemleriyle malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. MOORA oran yaklaşımı ve TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemleriyle yapılan malzeme seçimlerinde ilk sırayı her iki yöntemde de ağırlıkça %2 oranında B₄C nanoparçacıkları katkılı epoksi esaslı nanokompozitin, ikinci sırayı yine her iki yöntemde de ağırlıkça %1 oranında B₄C katkılı epoksi esaslı nanokompozitin aldığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde üçüncü sırayı MOORA oran yaklaşımında ağırlıkça %0.5 oranında B₄C katkılı nanokompozit alırken, TOPSIS yönteminde ise ağırlıkça %3 oranında B₄C katkılı nanokompozitin aldığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda seçilen malzemeler içerisinde ise son sırayı, MOORA oran yaklaşımında ağırlıkça %5 oranında B₄C katkılı nanokompozitin aldığı, TOPSIS yönteminde ise katkısız epoksi esaslı reçinenin aldığı sonucuna varılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçların daha önce yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. TOPSIS yönteminde kriterlere ait ağırlık katsayılarını değerlendiren matematiksel süreçler içerirken, MOORA yöntemi ise ağırlık katsayıları olmadan basit matematiksel işlemler içermektedir. Dolayısıyla her iki çok kriterli karar verme yöntemiyle de güvenilir malzeme seçimi yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

5. Kaynaklar

- Aruldoss, M., Lakshmi, T. M., Venkatesan, V. P. 2013.** A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *Am. J. Inf. Syst.* 1(1):31-43. DOI: 10.12691/ajis-1-1-5.
- Athawale, V. M., Chakraborty, S. 2012.** Material selection using multi-criteria decision-making methods: a comparative study. *Proc. Inst. Mech. Eng. L.* 226(4):266-285. DOI: 10.1177/1464420712448979.
- Bhadra, D., Dhar, N. R. 2022.** Selection of the natural fiber for sustainable applications in aerospace cabin interior using fuzzy MCDM model. *Mater.* 21:101270. DOI: 10.1016/j.mtla.2021.101270.
- Brauers, W. K., Zavadskas, E. K. 2006.** The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control Cybern.* 35(2):445-469.
- Chakraborty, S. 2011.** Applications of the MOORA method for decision making in manufacturing environment. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 54(9):1155-1166. DOI: 10.1007/s00170-010-2972-0.
- Çalışkan, H., Kurşuncu, B., Kurbanoglu, C., Güven, Ş. Y. 2012.** TOPSIS metodu kullanılarak kesici takım malzemesi seçimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(3), 35-42.
- Deng, Y. M., Edwards, K. L. 2007.** The role of materials identification and selection in engineering design. *Mater. Des.* 28(1):131-139. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.05.003.
- Doumpos, M., Zopounidis, C. 2002.** Multicriteria decision aid classification methods (Vol. 73). Springer Science & Business Media.
- Dymova, L., Sevastjanov, P., Tikhonenko, A. 2013.** A direct interval extension of TOPSIS method. *Expert Syst Appl.* 40(12):4841-4847. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.02.022.
- Edwards, K. L. 2005.** Selecting materials for optimum use in engineering components. *Mater. Des.* 26(5):469-473. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.07.004.
- Ghaleb, A. M., Kaid, H., Alsamhan, A., Mian, S. H., Hidri L. 2020.** Assessment and comparison of various MCDM approaches in the selection of manufacturing process. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 4039253. DOI: 10.1155/2020/4039253.
- Gültekin, K., Uğuz, G., Topcu, Y., Özel, A. 2021.** Structural, thermal, and mechanical properties of silanized boron carbide doped epoxy nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.* 138(42):51244. DOI: 10.1002/app.51244.
- Hwang, C. L. Yoon, K. 1981.** Methods for multiple attribute decision making. In *Multiple Attribute Decision Making*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Jahan, A., Mustapha, F., M. Y. Ismail, M.Y., Sapuan, S.M., Bahraminasab, M. 2011.** A comprehensive VIKOR method for material selection. *Mater. Des.* 32(3):1215-1221. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.015.
- Karande, P., Zavadskas, E., Chakraborty, S. 2016.** A study on the ranking performance of some MCDM methods for industrial robot selection problems. *Int. J. Ind. Eng. Comput.* 7(3):399-422. DOI: 10.5267/j.ijiec.2016.1.001.
- Patnaik, P. K., Swain, P. T. R., Purohit, A. 2019.** Selection of composite materials for structural applications through MCDM approach. *Mater. Today: Proc.* 18:3454-3461. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.273.
- Rahim, A. A., Musa, S. N., Ramesh, S., Lim, M. K. 2020.** A systematic review on material selection methods. *Proc. Inst. Mech. Eng. L.* 234(7):1032-1059. DOI: 10.1177/1464420720916765.
- Raju, S. S., Murali, G. B., Patnaik P. K. 2020.** Ranking of Al-CSA composite by MCDM approach using AHP-TOPSIS and MOORA methods. *J. Reinf. Plast. Compos.* 39(19-20):721-732. DOI: 10.1177/0731684420924833.
- Sarkar, A. 2014.** A TOPSIS method to evaluate the technologies. *Int. J. Qual. Reliab. Manag.* 31(1):2-13. DOI: 10.1108/IJQRM-03-2013-0042.
- Singh, A. K., Avikal, S., Sharma, A., Verma, R. P. 2021** Selection of suitable metal matrix composite for design application using MCDM approach. *Mater. Today: Proc.* 46:10771-10775. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.672.



Effect of Section Geometry and Material Type on Energy Absorption Capabilities of Crash Boxes

Kesit Geometrisinin ve Malzeme Tipinin Çarpışma Kutularının Enerji Emme Yeteneklerine Etkisi

Ertan Köseadağ*, Devrim İşler

Van Yüzüncü Yıl University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Van, Turkey

Abstract

In this study, the energy absorption capabilities of crash boxes, which provide energy absorption during an accident in the automotive transportation sector, were investigated. For this purpose, crash boxes in two materials and four geometries, Al6063 and A36 steel, were designed. The effects of triangle, square, circular, and hexagon cross-section geometries and material type on energy absorption were investigated using the finite element method, provided that the cross-sectional areas remained the same. In order to minimize the effect of mesh size on the analysis results made with the finite element method, a mesh free preliminary study was performed. Then crash boxes made of all geometric sections and materials were subjected to crash tests under the same boundary conditions. As a result of the analysis, damage patterns, force-time curves, and energies absorbed by crash boxes were obtained. According to these results, the order from the most energy absorbing to the least energy absorbing geometry is hexagon, circle, square, and, triangle. The same results were obtained for both material types. Steel material showed about ten times more reaction force than aluminum material.

Keywords: Crash box, Crashworthiness, Finite element method, Geometric section.

Öz

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe kullanılan ve meydana gelen bir kaza sırasında enerji absorpsiyonunu sağlayan çarpışma kutularının enerji absorpsiyon yetenekleri araştırılmıştır. Bu amaçla Al6063 ve A36 çelik olmak üzere iki farklı malzeme ve dört farklı geometride çarpışma kutuları tasarlanmıştır. Üçgen, kare, dairesel ve altıgen kesit geometrilerinin ve malzeme tipinin enerji absorpsiyonuna etkileri, kesit alanları aynı kalmak şartıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analiz sonuçlarında mesh boyutunun etkisini en aza indirmek için meshten bağımsızlaştırma ön çalışması yapılmıştır. Daha sonra farklı geometrik kesitlerden ve farklı malzemelerden oluşan çarpışma kutuları aynı sınır şartlarında çarpışma testlerine tabi tutulmuştur. Analizler sonucunda, çarpışma kutuları tarafından emilen enerji miktarları, hasar modelleri, kuvvet-zaman eğrileri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre en çok enerji yutan geometriden en az enerji yutan geometriye doğru sıralama altıgen, daire, kare ve üçgen şeklindedir. Her iki malzeme türü için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çelik malzemenin, alüminyum malzemedan yaklaşık on kat daha fazla reaksiyon kuvveti gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çarpışma kutusu, Çarpışmaya dayanıklılık, Geometrik kesit, Sonlu elemanlar metodu

1. Introduction

Crash boxes are passive safety systems such as seat belts and airbags. While the seat belt restricts the forward movement of the passengers in the event of an accident, the airbags reduce the possibility of death and injury by absorbing the

severity of the blows that the passengers may receive in the event of a possible collision. Crash boxes, on the other hand, absorb the impacts that may occur in the event of a possible collision and ensure that the passengers are affected by these impacts at the minimum level. Crash boxes are located at the front and rear of the vehicles and provide safety in both front and rear collisions (Kılıç 2018). Crash boxes, which are used in automobiles and located on the front bumper, are fasteners that can absorb the kinetic energy that occurs in frontal collision accidents by deforming them. In the event of an accident, if the impact forces that the crash boxes are exposed to cannot sufficiently absorb, it causes these forces

*Corresponding author: ekosedag@yyu.edu.tr

Ertan Köseadağ orcid.org/0000-0002-5580-0414

Devrim İşler orcid.org/0000-0002-9878-3546



to be transferred directly to the passenger compartment in the vehicle. This situation will both cause fatal injuries to the passengers in the vehicle and cause a high amount of material damage to the vehicle.

An ideal crash box, energy absorption and crush force efficiency values are expected to be high. In other words, while the crash box is expected to absorb high energy, it is also desired that the forces generated in the collision zone are close to each other. The fact that the forces generated in the collision zone are close to each other means that the passengers in the vehicle are minimally affected by the impacts that occur during the collision. Therefore, it is desired that the difference between the maximum force and the average force in the collision zone should be small. Although these two conditions are important, they increase their importance in other cases day by day. For example, vehicles are required to be light in order to reduce both fuel consumption and carbon emissions. Therefore, it is important that crash boxes are also light. For this reason, specific energy absorption, which is another concept, is expected to be high. Although energy absorption is tried to be increased in the studies for the development of crash boxes, it is also necessary to lighten the crash boxes.

Energy dissipation characteristics vary depending on the microstructure of the materials, the geometric forms of the fabricated structures and the application conditions of the impact force. For this reason, the suitability of the designed structures for the purpose, their mechanical behavior when exposed to impact loads and the types of damage should be determined during the design process (Marzbanrad et al. 2009). While examining the structures of crash boxes, the issues that are generally discussed are; energy absorption, maximum crush force, average crush force, total displacement, specific energy absorption and, crush force efficiency (Cerit 2011). Impact absorbing materials used in vehicles absorb the vehicle's kinetic energy to a certain extent by undergoing plastic deformation.

The energy absorption capacities of the crash boxes differ according to the designs made. Although crash boxes have variable geometries, they can generally be classified as tubular energy absorbers, conical energy absorbers, polygonal columns, sandwich plates, honeycomb structures and other forms (Alghamdi 2001). In most of the studies, crash boxes generally have a flat structure (Cerit 2011). Crash boxes used in vehicles are available in empty and full profiles. Empty profiles have different energy absorption abilities according to the properties of the materials they are made

of. At the same time, it is possible to increase the energy dissipation capacity of hollow profiles as a result of various secondary processes. In order to increase the damped energy capacity, the cross-sectional geometries of the materials used as shock absorbers were changed and they were filled with high-strength materials. Some studies in this field in the literature are summarized below.

Langseth et al. (1996) experimentally investigated the behavior of a square section crash box with aluminum alloy 6061 material under axial loads. According to the tests, they state that the energy absorbed with deformation and the permanent displacement occurring axially are in a parallel relationship, and the deformation that occurs symmetrically in the profiles varies according to the profile wall thickness and the hardness degree of the material used. In addition, they stated that symmetrical or asymmetrical folding due to crushing in the face of static and dynamic loads affects the damped energy, and more energy is absorbed when it is symmetrical. Hou et al. (2007) made optimizations on the maximum deformation force and specific energy absorption of single and multi-cell crash boxes. Analysis of the crash boxes was done using the finite element method. The square cross-section crash boxes used in the study were designed as single-cell, double-cell, three-cell and, four-cell. The design variables were determined as different base widths and wall thicknesses. As a result, they determined that the specific energy dissipation capacity increased with increasing the number of cells in the sections. In addition, they stated that increasing the number of cells causes an increase in the maximum deformation force required for the crash boxes to initiate the first deformation. Demirci et al. (2014) performed finite element analysis in order to determine the energy absorption capacities of crash boxes with different geometries in frontal crash situations. They experimented by changing the wall thickness and geometry of the profiles. The material of the crash boxes was determined as steel and finite element analysis was carried out by axially striking a rigid wall with a mass of 80 kg at a speed of 15.6 m/s with LS-DYNA software. According to the results, it has been determined that the wall thickness has a great effect on the absorbed energy. In a study on conical and thin-walled crash boxes by Nagel et al. (2004). They investigated the changes in energy absorption capacity of crash boxes under axial impact loads using the finite element method. In the study, they determined the wall thickness of the profiles, the semi-conicity angles and the number of inclined surfaces as variable parameters, and investigated the effects of these variables

on the energy absorption capacities of the crash boxes by performing dynamic loading at 10 m/s, 15 m/s and 20 m/s speeds. As a result, they stated that reducing the lengths and increasing the width of the profiles would increase the energy absorption capacity per unit mass. They also stated that inclining the surfaces also reduces the crushing forces, and increasing the load angle reduces the energy capacity of the damped under slow compression loads. Aktay et al. (2011) applied compression tests to aluminum profiles filled with honeycomb structure under axial loads and investigated the energy absorption capacities of these profiles. The authors applied compression tests to the profiles in such a way that they deform 50% to 80% of their height. As a result of the study, it was stated that when the cell diameter of the honeycomb structure placed inside the crash box is 3.2 mm, the specific energy absorption capacity is 9.68 kJ/kg. When the cell diameter is increased to 4.8 mm, the specific energy absorption capacity is 9.14 kJ/kg and when it is increased to 6.4 mm, it is determined as 8.11 kJ/kg. With the increase in cell diameter, the specific energy absorption capacity began to decrease. Energy dissipation studies are being tested on materials with various shapes. It has been shown in the studies that the energy dissipation ratios change with the change of the profiles. A study proving this was done by Elgalai et al. (2004) in experiments, they tested two types of crash boxes, consisting of glass fiber and carbon fiber. The angle of the corner groove bends of the tested crash boxes was adjusted to be between 10 and 40 degrees. With the tests performed, it was determined that the energy absorbing ability, specific energy absorption and crushing force increased with the increasing number of grooves in the crash boxes. They also determined that the crash boxes produced with carbon fiber material with an angle of 40 degrees have the highest energy absorption capacity. Peroni et al. (2009) stated that crash box is a deformable device, which is able to dissipate kinetic energy. The efficiency of devices depends on the thin wall prismatic column, geometry of device at front rail, material thickness, dimensions of the cross section, structural material used in fabrication as well as the application of joining system used. The research concluded that high capacity of energy absorption could be obtained using adhesive bonding and continuous welding in structures subjected to crash (Yusof et al. 2017). From the above review of the literature, it is concluded that crash box must have the ability to absorb energy during collision. The crash box must undergo plastic deformation prior to other parts to minimize the vehicle damage. Researchers had come up with new design to improve the energy absorption

capability. The parameters often determined to improve crash box performance included thickness, cross section dimensions, types of material and the ditches on the crash box, called crash bead (Kosedag and Ekici 2022, Kosedag et al. 2022).

Samer et al. (2013) examined the effect of the geometry of the crash boxes they created from aluminum alloy under static loading. According to the results, it was revealed that the increase in the cross-sectional area leads to an increase in the absorbed energy. According to the data obtained as a result of axial loading on crash boxes made of composite material, an increase was observed in peak force as the number of edges increased (Hussain et al. 2017).

Researchers and manufacturers spend a significant amount of time and money on product development. Since it is costly to evaluate the performances of the designed product, SEM etc. methods are important for saving both time and money. When FEM is modeled according to reality, it gives results very close to reality. This has been proven by many studies in the literature (Kösedağ and Ekici 2021, 2019, Şen et al. 2018, Ekici and Kosedag 2017).

In this study, crash boxes with the same cross-sectional area and height were designed in four geometries (circular, triangle, square, hexon). Crash boxes were modeled using two structural materials (structural steel and aluminum alloy) and crash tests were analyzed using the finite element method. With the analysis, the energy absorption capabilities of the crash boxes with the same weight and different geometry were determined, and the time-dependent changes of the forces transferred on the crash boxes were transferred to the graphics and presented.

2. Finite Element Analysis

Crash box analysis designed in four different sections was performed. Crash box geometries are triangular, square, hexagonal, and circular. As can be seen in Figure 1, the cross-sectional areas of all geometries are approximately equal. Besides, they are equal in length and therefore all crash boxes made of the same material have equal weight. The cross-sectional areas of the crash boxes are approximately 585 mm² (± 4 mm²) and their length is 350 mm. other geometric variables are presented in Figure 1. Triangular and hexagonal geometries are equilateral.

Analyzes were carried out using the finite element method and firstly, mesh decoupling was performed so that the results were not affected by mesh sizes. For this, analyzes

Table 1. Mechanical properties (Al6063) and Johnson-Cook (A36) parameters and of the materials used (Tarlochan et al. 2013, Dirgantara et al. 2018).

	E (MPa)	Poisson's ratio of	Density (tonne/mm ³)	A	B	n	m
A36 Steel	200000	0.26	7.85E-9	146.7	896.9	0.320	0.323
Al 6063	68210	0.3	2.7E-9	-	-	-	-

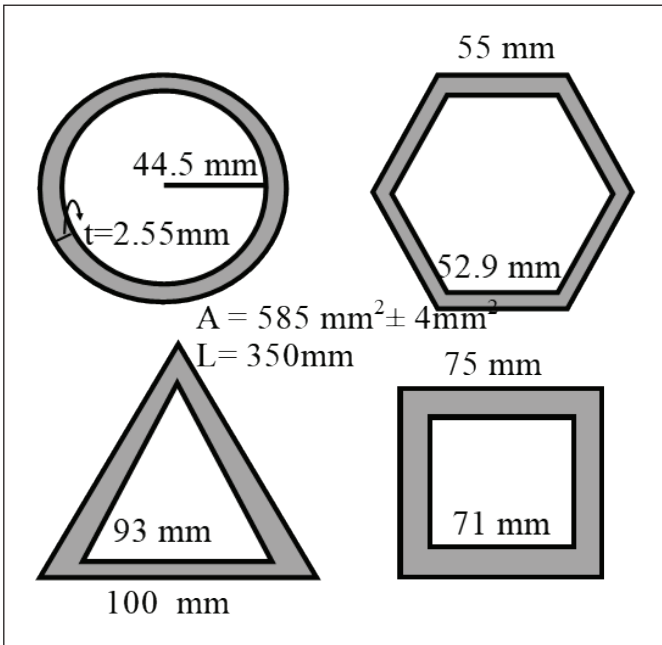


Figure 1. The designed geometric sections and dimensions.

were carried out under the same conditions by meshing in different sizes, and the mesh size was decided from the dimensions where the result did not change anymore. The result of the work done for this is given in Figure 2.

As can be seen in Figure 2, starting from 8 mm mesh size, the meshes are reduced at equal intervals up to 1 mm and the energy absorbed by the crash box is obtained. When the results were evaluated, it was seen that the result did not change under 5 mm mesh size, and therefore, it was decided that the mesh size should be 5 mm in the future analyzes.

Using aluminum and structural steel materials, a total of 8 types of crush analyzes were carried out in two different materials and four different geometries. The 8 types of analysis statements originate from 2 types of materials and 4 types of geometry. Aluminum 6063 and A-36 steel used to define the material properties, for aluminum, the elasto-plastic properties that can be seen in the Figure 3. In addition, Johnson-Cook parameters of A-36 steel are also defined. All these values are shown in Table 1.

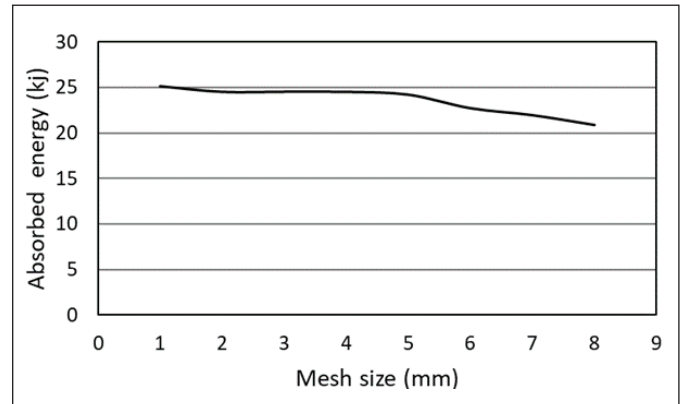


Figure 2. The amount of energy absorbed versus the mesh size made for mesh free operation.

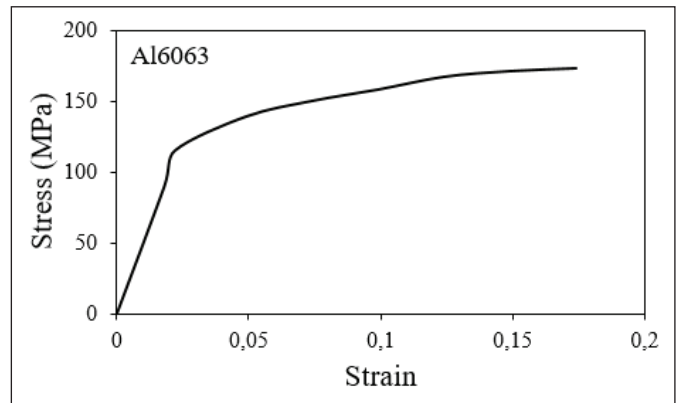


Figure 3. Stress strain curve for Al 6063 (Dirgantara et al. 2018).

Finite element analysis was performed using the ABAQUS trial version package program. The modeling process was done with 4 node shell continuum (S4R) shell elements. The impact velocity and the weight of the impactor were determined as 15 m/s and 270 kg, respectively, taking into account the literature (Tarlochan et al. 2013). As the boundary conditions (Figure 4), the crash box was designed with tangant properties with a friction coefficient of 0.2 between the walls. Besides, movement of the impact wall only in the direction of the axis of the crash box was allowed.

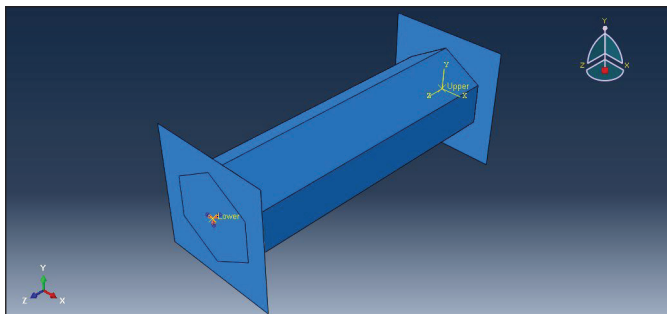


Figure 4. Boundary conditions of the design.

3. Result and Discussion

Al6063 and A-36 steel materials were defined, crash boxes in four different geometries were designed, and a 270 kg obstacle was hit with a speed of 15 m/s with finite element analysis. As explained in the second section (Finite Element Analysis), mesh free operations were carried out so that the analyzes were not affected by the mesh size. Figure 5 shows the gradual collision images of materials in triangular (A), square (B), hexagonal (C), circle (D) sections with aluminum 6063 material defined. The cross-sectional areas of the materials are kept approximately equal and their lengths are equal. So their volumes and hence their weights are equal. Each image shows the damage in the first 8 steps. When the figures are examined, it is seen that the geometry in the triangular section has a more intense regional stress load (red color) than the other geometries. For this reason, the more intensely loaded regions in the triangular section were deformed faster. In addition, it is observed that as the number of edges increases, the edges provide resistance and distribute the stress more uniformly. Besides, since there is no edge in the circular section, it has been observed that the folding numbers are more resistant than the others due to the fact that they are more early and more numerous. It can be seen that the folded regions in the upper part of the circular region provide support for the lower parts.

Finally, it is observed that the folding in the triangular section becomes more and more irregular starting from the middle of the impact process. It is the crash box with the most uniform folding circular cross-section. However, folding occurs earlier in the circular section than in the hexagonal section and more folding occurred.

In Figure 6, how the forces acting on the Al6063 crash boxes change over time is plotted. Each force peak seen in the graphs gives us the forces at which folding takes place. Accordingly, the multiplicity of the number of folds in the circular section can also be seen in the peak excess in Figure

6. In addition, the reaction force for the circular section decreased sharply immediately after the folding took place, and the force increased immediately after the next folding. In the hexagon structure, the folding peaks are less and the force resistance shown after folding is higher than the other geometric sections. According to Figure 6 graphics, the weakest geometry in terms of force resistance is seen as a triangular section.

Sequential macro images of crash boxes made of steel in triangular (A), square (B), hexagonal (C), circle (D) sections during the collision are presented in Figure 7. It is also possible to see results similar to aluminum results here. However, when the stresses on the images (red color) are taken into account, it can be seen that less stress occurs compared to the aluminum material. According to Al6063, the folding irregularity in the triangular section has increased, and the folding irregularity in the square section has become evident. Similarly, it was determined that the hexagon and circular sections exhibited more uniform behavior and the circular section crash box showed more folding behavior. In addition, due to the higher strength of steel material than aluminum, steel crash boxes exhibited a more resistant behavior and it was determined that the amount of crushed parts was less than aluminum. However, it should not be forgotten that the weight of the steel (7.8 g/cm³) material is approximately 3 times more than aluminum (2.7 g/cm³).

In Figure 8, the time variation of the reaction forces of steel crash boxes in circular, hexagon, square, triangle sections during the collision is given. The abundance of force peaks, which proves the excess of the folding numbers in the circular section, can be seen here as well. Similarly, it can be seen that the triangular form shows lower force resistance than the other forms, and the hexagon is more resistant when the average force is taken into account.

While the initial reaction force of crash boxes during the collision is around 250 kN in steel boxes, the initial reaction force in aluminum is in the range of 50-60 kN. steel crash boxes exhibited an average of 5 times higher reaction force.

As it is known, the areas under the force deformation curves give the energies absorbed by the crash boxes. One of the results obtained from the analyzes is the amount of energy absorbed by the crash boxes. The variation of absorbed energy amounts according to geometry and material type is presented in Figure 9. According to these results, ranking from the highest energy absorbing box to the lowest for both material types; hexagon, circular, square, and triangle. These results agree with the results of macro pictures and force-time

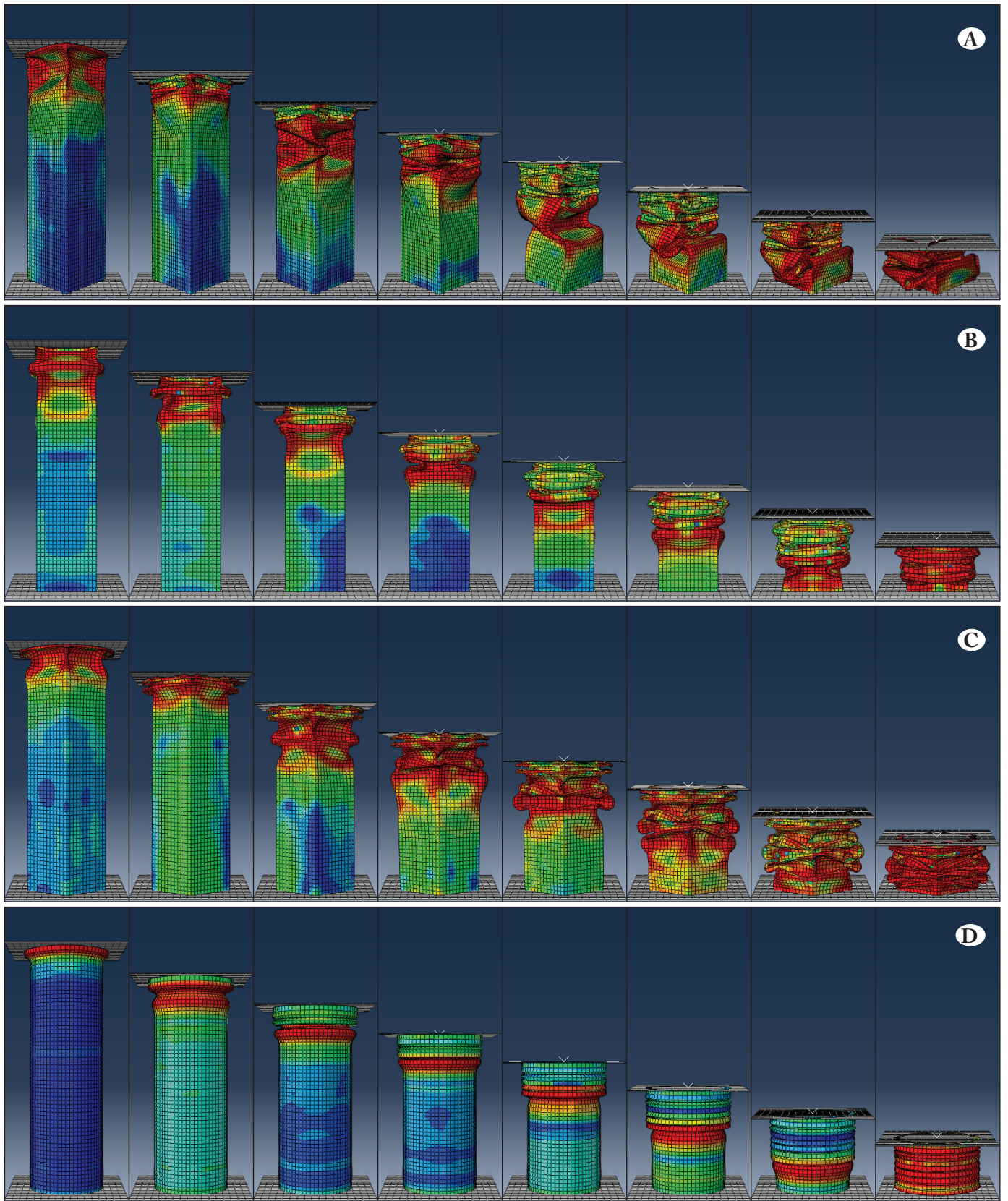


Figure 5. Progressive crushing of triangular (A), square (B), hexagonal (C), circle (D) form made of Al6063 material.

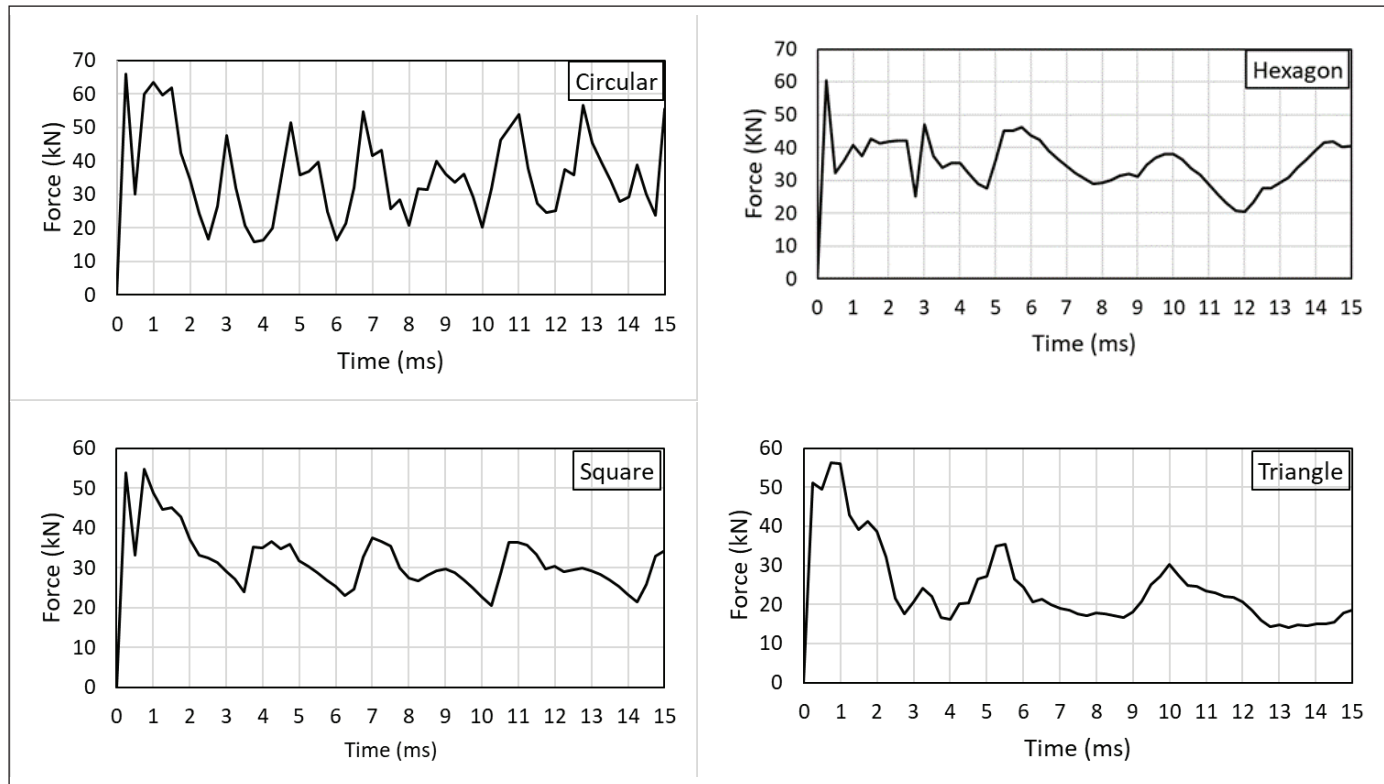


Figure 6. Force variation over time on crash boxes of different geometric cross-sections made of Al6063.

curves. The absorbed energies in the steel material model are 3.11, 3.35, 3.42, and 3.48 kJ for materials in hexagon, circular, square, and triangle sections, respectively. In the same order, the amount of energy absorbed by aluminum crash boxes is 0.230, 0.285, 0.324, and 0.353 kJ. Compared to aluminum, it has been determined that steel crash boxes absorb 13.5 times more energy in triangular section, 11.75 times more in square section, 10.55 times more in circular section, and finally 9.85 times more energy in hexagon sectioned material. It is seen that the difference between steel and aluminum decreases from the crash box geometry that absorbs the most energy to the one that absorbs the least energy. According to the geometry of crash boxes made of steel material, the amount of energy absorption changes less than aluminum. For example, aluminum hexagon absorbs 53% more energy than aluminum triangle, while this is only 11.9% in steel material.

4. Conclusion

In this study, the effect of cross-section geometry and material on the energy absorption of crash boxes was investigated. For this purpose, crash analysis was performed using the finite elements method using 4 different geometries and two different materials. The materials used

are Al6063 and A36 steel. Crash boxes in hexagon, triangle, square, circular geometry were modeled, provided that their cross-sectional areas were approximately equal. In order for the results of the study to be minimally affected by the mesh size, analyzes were performed after the mesh free study. All crash boxes were analyzed under the same boundary conditions and loading conditions. A wall weighing 270 kg crashed into the crash boxes at a speed of 15 m/s. As a result of the analysis, deformation analysis was performed on macro images. How the forces on the crash boxes changed over time were plotted and finally the amount of absorbed energy was calculated. According to the results obtained, crash boxes made of steel absorb more energy than those made of aluminum. It was determined that the cross-section geometry had a significant effect on energy absorption. Accordingly, the order from the most absorbing to the least is as follows; hexagon, circle, square, and triangle. According to this result, it was concluded that the energy absorption ability of the material increased with the increase in the number of corners. In addition, it was expected that the absence of corners in the circular crash box would have a negative effect, but this did not happen. However, the fact that it is easy to fold in the form of a circle and the number of folds is high, provided resistance to the material

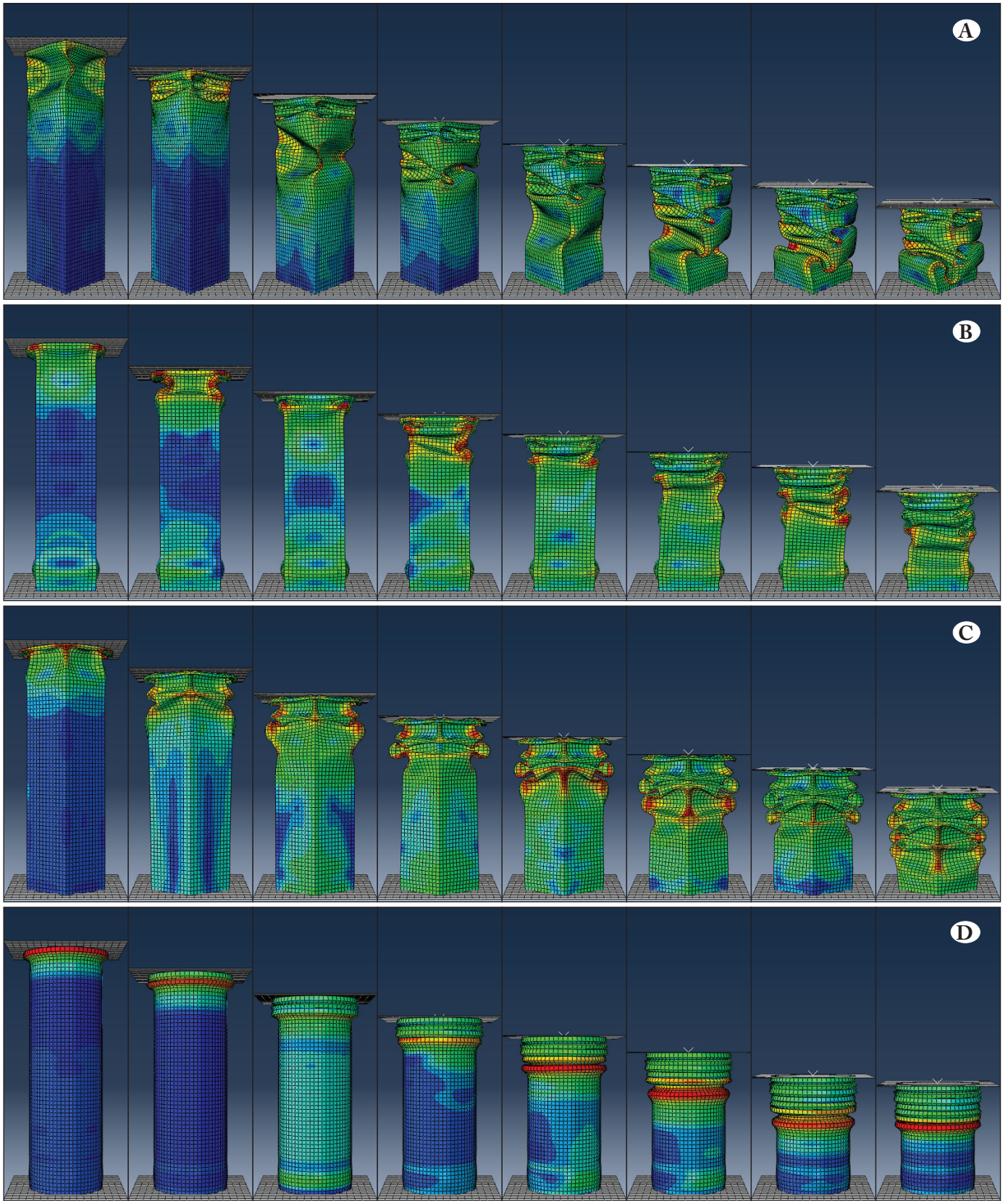


Figure 7. Progressive crushing of triangular (A), square (B), hexagonal (C), circle (D) form made of A-36 material.

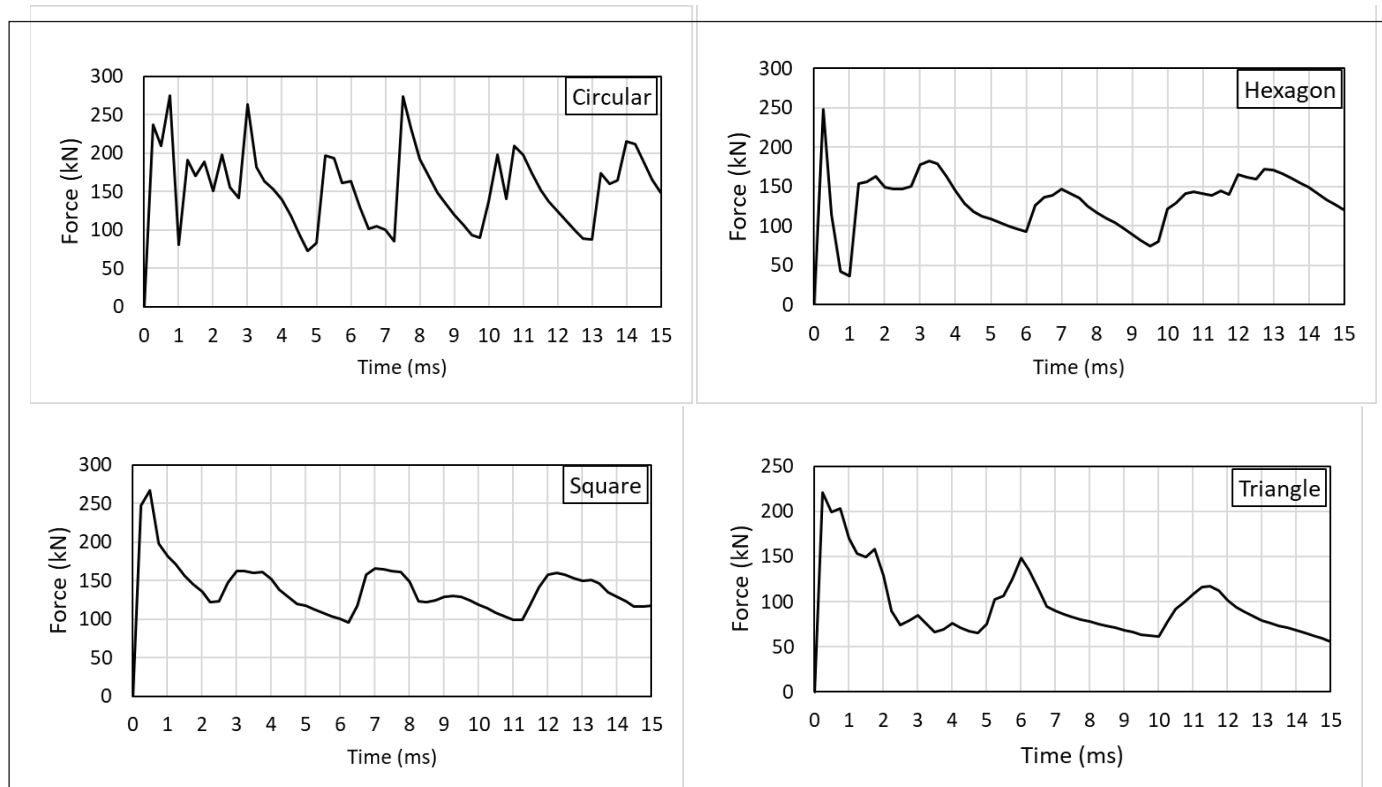


Figure 8. Force variation over time on crash boxes of different geometric cross-sections made of A-36.

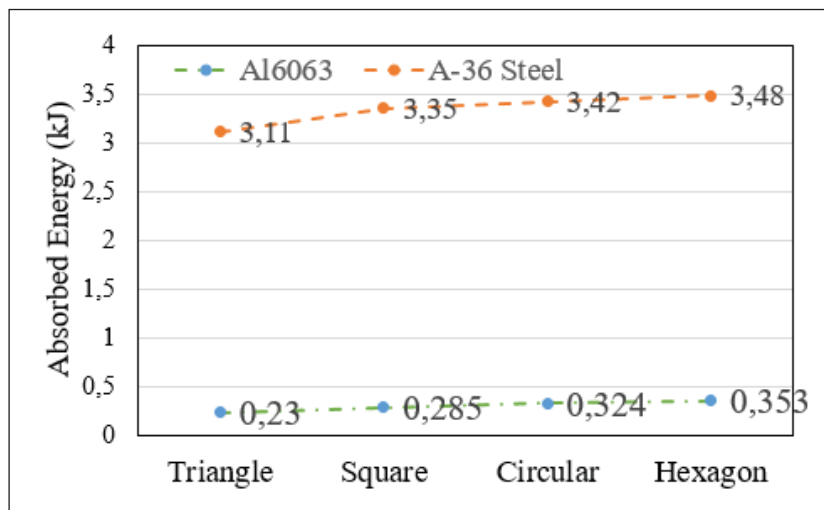


Figure 9. The energies absorbed by crash boxes according to material and geometry.

and exhibited the most durable performance after hexagon geometry. It has been determined that the results of both materials modeled from both aluminum and steel materials are in harmony with each other.

Conflict of Interest

All authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could appear to have influenced the work reported in this paper.

5. References

- Aktay L, Çakroğlu C, Güden M. 2011. Quasi-static axial crushing behavior of honeycomb-filled thin-walled aluminum tubes. *The Open Mater. Sci. J.* 5: 184-193. Doi: 10.2174/1874088X01105010184
- Alghamdi A. 2001. Collapsible impact energy absorbers: an overview. 2001. *Thin-Walled Struct.* 39(2): 189-213. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(00\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(00)00048-3)

- Cerit E.** 2011. Şehirler arası otobüslerde önden çarpışma enerjisini yutucu pasif güvenlik sisteminin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-19.
- Demirci E, Yıldız A.R, Semerci F.** 2014. Taşıtlarda önden çarpışma performansını etkileyen enerji yutucularının optimum tasarımı. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, Türkiye.
- Dirgantara T, Jusuf A, Kurniati E O, Gunawan L, Putra I S.** 2018. Crashworthiness analysis of foam-filled square column considering strain rate effect of the foam. *Thin-Walled Struct.* 129. Doi: 365-380. 10.1016/j.tws.2018.04.004
- Elgalai A.M, Mahdi E, Hamouda A.M.S, Sahari B.S.** 2004. Crushing response of composite corrugated tubes to quasi-static axial loading. *Compos. Struct.* 66(1): 666-671. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.06.002>
- Hou S, Li Q, Long S, Yang X, Li W.** 2008. Multiobjective optimization of multi-cell sections for the crashworthiness design. *Int. J. Impact Eng.* 35(11): 1355-1367. 10.1016/j.ijimpeng.2007.09.003
- Hussain, N. N., Regalla, S. P., Rao, Y. V. D.** 2017. Low velocity impact characterization of glass fiber reinforced plastics for application of crash box. *Mater. Tod. Proc.* 4(2): 3252-3262.
- Kılıç E.** 2018. Araçlardaki Aktif ve Pasif Güvenlik Sistemleri. <https://www.muhendis.tv/araclardaki-aktif-ve-pasif-guvenlik-sistemleri>, Erişim Tarihi: 12.11.2021.
- Kosedag E, Ekici R.** 2022. Low-velocity and ballistic impact resistances of particle reinforced metal-matrix composites: An experimental study. *J. Compos. Mater.* 56(7): 991-1002. doi:10.1177/00219983211068101
- Kosedag E, Aydın M, Ekici R.** 2022. Effect of stacking sequence and metal volume fraction on the ballistic impact behaviors of ARALL fiber-metal laminates: An experimental study. *Polym. Compos.* 43 (3): 1536-1545. <https://doi.org/10.1002/pc.26474>
- Kösedağ E., Ekici R.** 2021. Free Vibration Analysis of Foam-Core Sandwich Structures. *Politeknik Dergisi.* 24(1): 69-74. 10.2339/politeknik.571396
- Kösedağ E., Ekici R.** 2019. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe davranışları üzerine bir derleme. *nobu J. Eng. Sci.* 8(1): 384-393. 10.28948/ngumuh.517147
- Ekici, R., Kosedag E.** 2017. Comparison of the low-velocity impact behaviors of SiC and pumice particle-reinforced metal matrix composites. *International Journal of Mechanical and Production Engineering.* 5.10: 101-105.
- Langseth M, Hopperstad O.S.** 1996. Static and dynamic axial crushing of square thin walled aluminium extrusions. *Int. J. Impact Eng.* 18: 949-968. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(96\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(96)00025-5)
- Marzbanrad J, Mehdikhanlo M, Pour A.** 2009. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminium tubes under impact loading. *Turkish J. Eng. Environ. Sci.* 33(1): 159-166. <https://doi.org/10.3906/tar-1301-112>
- Nagel G.M, Thambiratnam D.P.** 2004. Dynamic simulation and energy absorption of tapered tubes under impact loading, *Int. J. Crashworthiness.* 9: 389-399. <https://doi.org/10.1533/ijcr.2004.0298>
- Peroni L, Avalle M, Belingardi G.** 2009. Comparison of the energy absorption capability of crash boxes assembled by spot-weld and continuous joining techniques, *Int. J. Impact Eng.* 36: 498-511. 10.1016/j.ijimpeng.2008.06.004
- Samer, F., et al.** 2013. Improvement of energy absorption of thin walled hexagonal tube made of magnesium alloy by using trigger mechanisms. *International Journal of Research in Engineering and Technology.* 2.10: 173-180.
- Şen Ş, Yaşar M, Koçar O.** 2018. Dorse tasarımında stres dağılım analizi ve topoloji optimizasyonu, *Karaelmas Fen ve Müh. Derg.* 8(1):309-16.
- Tarlochan F, Samer F, Hamouda A.M.S, Ramesh S, Khalid K.** 2013. Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces, *Thin-Walled Struct.* 71: 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.04.003>
- Yusof N.S.B, Sapuan S.M, Sultan M.T.H, Jawaid M, Maleque M.A.** 2017. Design and materials development of automotive crash box: a review, *Ciência & Tecnologia dos Materiais.* 29: 129-144. <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2017.09.003>



Effect of Fiber Orientation on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)/PVC Sandwich Composites

Elyaf Yöneliminin Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CETP)/PVC Sandviç Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi

S. Bahar Baştürk* 

Manisa Celal Bayar University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Manisa, Turkey

Abstract

In this study, laminated sandwich composites consist of glass fiber reinforced polymer (GFRP) face-sheets (skins) and polyvinyl chloride (PVC) foam were bonded together via conventional hand lay-up method. The effect of fiber orientation (0/90 or +45/-45) was examined in terms of compression and flexural properties. Flatwise (FW) compressive test provided the core dominated properties and only 0/90 fiber-oriented samples were tested. When the average edgewise (EW) compressive strength of (0/90)GFRP/PVC and (+45/-45)GFRP/PVC sandwich composites were compared, both of them showed similar results. Core crushing, local bending, debonding and core shear were observed as the common failure modes in the sandwich structures under bending. In terms flexural response, the 0/90 fiber oriented GFRP skin slightly showed better strength values as compared with +45/-45 fiber-oriented structures. By considering the all-quasi-static tests, it can be concluded that 0/90 and +45/-45 fiber oriented GFRP skins exhibited similar performance and there was no significant superiority for any of them.

Keywords: Sandwich composite, Flatwise test, Edgewise test, Flexural test, Failure modes

Öz

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer (CETP) yüzey tabakaları ve polivinil klorür (PVC) köpükten oluşan lamine sandviç kompozitler, geleneksel el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Fiber oryantasyonunun (0/90 veya +45/-45) etkisi, basma ve eğme özellikleri açısından incelenmiştir. Düzlemsel (yüzey-FW) basma testi, çekirdek (ara tabaka) özelliklerini domine ettiği için sadece 0/90 fiber yönelimli numuneler test edilmiştir. (0/90)CETP/PVC ve (+45/-45)CETP/PVC sandviç kompozitlerin ortalama yanal (EW) basma dayanımları karşılaştırıldığında, her ikisi de çok benzer sonuçlar göstermiştir. Sandviç yapılarda eğme yükü altında ortak çökme/kırılma tipleri olarak köpük ezilmesi, lokal eğilme, sandviç bileşenlerinin ayrışması ve çekirdek yapının kaymaya uğraması gözlenmiştir. Eğme davranışı açısından, 0/90 fiber yönelimli GFRP yüzey plaka, +45/-45 fiber yönelimli yapılara kıyasla az da olsa daha iyi mukavemet göstermiştir. Tüm statik testler göz önüne alındığında, 0/90 ve +45/-45 fiber yönelimli CETP yüzey plakalarının benzer performans sergiledikleri ve hiçbirinde belirgin bir üstünlük olmadığı sonucuna varılabilir.

Anahtar Kelimeler: Sandviç kompozit, Düzlemsel (Yüzey) basma testi, Yanal basma testi, Eğme testi, Kırılma tipleri

1. Introduction

Application of composite materials in many fields is becoming so popular due to their specific strength and stiffness values as well as light weightness. As a specific group of composites, sandwich structures are mainly used in maritime,

aerospace, aviation and automobile industries (Oterkus et al. 2016). Laminated sandwich composites are utilized in high performance lightweight structures and comprised of a low-density porous core material locates in between top and bottom face-sheets (or skins). Those thin face-sheets show strong and stiff characteristics under in-plane loading (Pareta et al. 2020). Additionally, in sandwich composites, core component enhances both flexural rigidity and energy absorption capacity, which exhibit vital importance. The cores used in sandwich composites can be produced from various polymeric or metallic materials such as PU, honeycomb, PVC, aluminum and nickel (Girish and Mohandas

*Corresponding author: bahar.basturk@cbu.edu.tr

S. Bahar Baştürk  orcid.org/0000-0002-4027-1935



2020, Uzey and Geren 2020). In general, fiber reinforced polymer (FRP) composites are the most popular type of face-sheet constituents. As it is well known that, polymeric resin is the matrix phase and the fiber is considered as the reinforcement component in FRP systems. The presence of fibers provides stiffness and strength due to its high aspect ratio and those fibers are embedded into a low density but tough polymer matrix. (Kosedag et al. 2021). To enhance the fatigue and corrosion resistance as well as other mechanical properties, some metals such as aluminum, titanium and magnesium have been integrated with FRP and led to significant improvements particularly in military and defence applications (Kosedag et al. 2022, Kosedag and Ekici 2021). In literature, performance of glass, carbon, aramid, flax and jute fiber reinforced composite skins with various foams have been investigated by many researchers (Samlal, et al. 2020, Balıkoğlu et al. 2022). For instance, in case of marine applications, it is primarily aimed to enhance the resistance to seawater, which causes degradation of materials. Furthermore, weight reduction and improved mechanical properties are the other major concerns in naval structures. With the introduction of sandwich composites into ship hulls, decks and bulkheads, remarkable improvements in terms of those aspects have been observed (Palomba et al. 2021, Calabrese et al. 2016). Crupi et al. (2013) investigated the aluminium sandwiches used in ship buildings and they compared the impact characteristics of cellular foam and honeycomb-based sandwiches via experimental tests. According to that study, the collapse of the honeycomb panel emerges due to progressive crumpling of cell walls while the cellular foam samples fail because of crushing of core. Balıkoğlu et al. (2020) focused on the flatwise compression and flexural loading performances of pin-reinforced foam core sandwich (PRFCS) panels. E-glass non-crimp biaxial fiber/vinyl ester skin material was integrated with perforated PVC foam to understand the effects of hole diameters. This study showed that the foam cores with denser area fraction of the holes can be utilized in sandwich composites with enhanced load-carrying capacity. Shen et al. (2017) examined the ultimate strength and fatigue properties of L-joints used in ship structures. That research revealed that both fatigue life and stiffness of sandwich L-joints are declined with the increase of loading and the significant failure types are sandwich debonding, sandwich face/core delamination, and gelcoat damage.

As briefly expresses above, a great portion of studies explore the performance of foams and composite stacking sequences. Core type and thickness, skin material, the number of

layers in the face-sheet (if it is fiber reinforced polymer-FRP composite) or the test parameter variation (such as span length in flexural test or the strain rates in edgewise test) in various tests have been investigated thoroughly. However, there have been limited studies concentrated on the fiber orientation effects on the quasi-static mechanical behavior, which can exhibit some alterations in terms of mechanical response of sandwich composites. Present paper examined the mechanical properties sandwich composites consisted of glass fiber reinforced (GFRP) face-sheet and polyvinyl chloride (PVC) foam core. The 0/90 (cross-ply) and +45/-45 oriented fiber clothes were integrated with epoxy matrix and consolidated with core material via traditional hand lay-up technique. Flatwise (FW) compression, edgewise (EW) compression and flexural responses of prepared samples were determined to compare their mechanical performances.

2. Materials and Method

The E-glass fabrics with 600 g/m^2 (Metyx™) areal density was selected as the reinforcement phase and integrated with epoxy resin (Duratek™ DTE 1200 resin and DTS 2110 hardener for a resin-hardener ratio of a 100:20 by weight) for composing skin (face-sheet) component of sandwich structures. Two different fiber orientation (0/90 and +45/-45) from the same fabric system were used for comparison and 10 mm thick PVC foam (Maricell[®]-M080 foam with 80 kg/m^3 density) was chosen as the core material. Three layers of glass fabric were stacked as the skin and consolidated with core component by conventional hand lay-up technique. The manufactured sandwich panel containing 2x3 layers of composite face-sheets with approximately 4 mm total thickness cured at room temperature for 48 hours. After post-curing process (80°C for 8 hours), whole structure were cut into required dimensions regarding to ASTM standards for mechanical characterization (see Figure 1). In this study, the samples containing glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite with 0/90 fibre orientation and PVC foam core are abbreviated as (0/90) GFRP/PVC. Similarly, the sandwich composites consisting of +45/-45 fibre-oriented face-sheet is symbolized as (+45/-45) GFRP/PVC.

In the present work, flatwise (FW) compression test was only applied to (0/90) GFRP/PVC specimens. ASTM C-365M is a core dominated standard therefore it is concluded that the characteristic behaviour of one sandwich sample group was sufficient for this test (Ferreira et al. 2016). The average

length, width and thickness values of three FW test samples were calculated as 50.3 ± 0.08 , 50.03 ± 0.07 and 14.2 ± 0.33 mm, respectively. To precisely determine the effect of fibre orientation in terms of mechanical performance, both edge-wise (EW) compression and flexural tests were carried out by considering ASTM C-364 and ASTM C-393 standards, respectively. Three specimens were used for each test and the crosshead speed value was determined as 1 mm/min for EW and FW tests while 1.5 mm/min was applied during flexural test. It should be noted here that three-point bending apparatus was utilized for flexural characterization. The average

dimensions of sandwich samples are given in Figure 2 with their standart deviations.

Representative test samples are displayed in Figure 3 and the necessary equations to calculate the mechanical parameters related with those tests are given in Table 1. The σ_{FW}^{ult} , E_{FW} , σ_f , σ_{cs} and σ_{EW}^{ult} correspond to the flatwise ultimate strength, flatwise compression modulus, face-sheet bending strength, core shear strength and edgewise ultimate strength, respectively. Additionally, c , t and d represent the core, face-sheet, and total sandwich thickness values, respec-

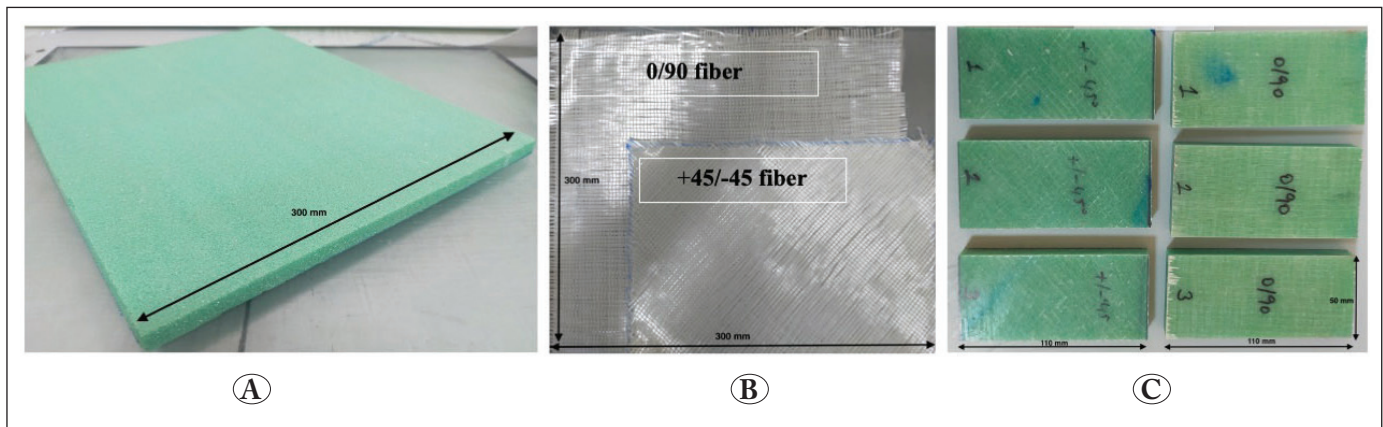


Figure 1. A) PVC foam core, B) 0/90 and +45/-45 fibre clothes, C) sandwich composite samples with 0/90 and +45/-45 fibre orientations.

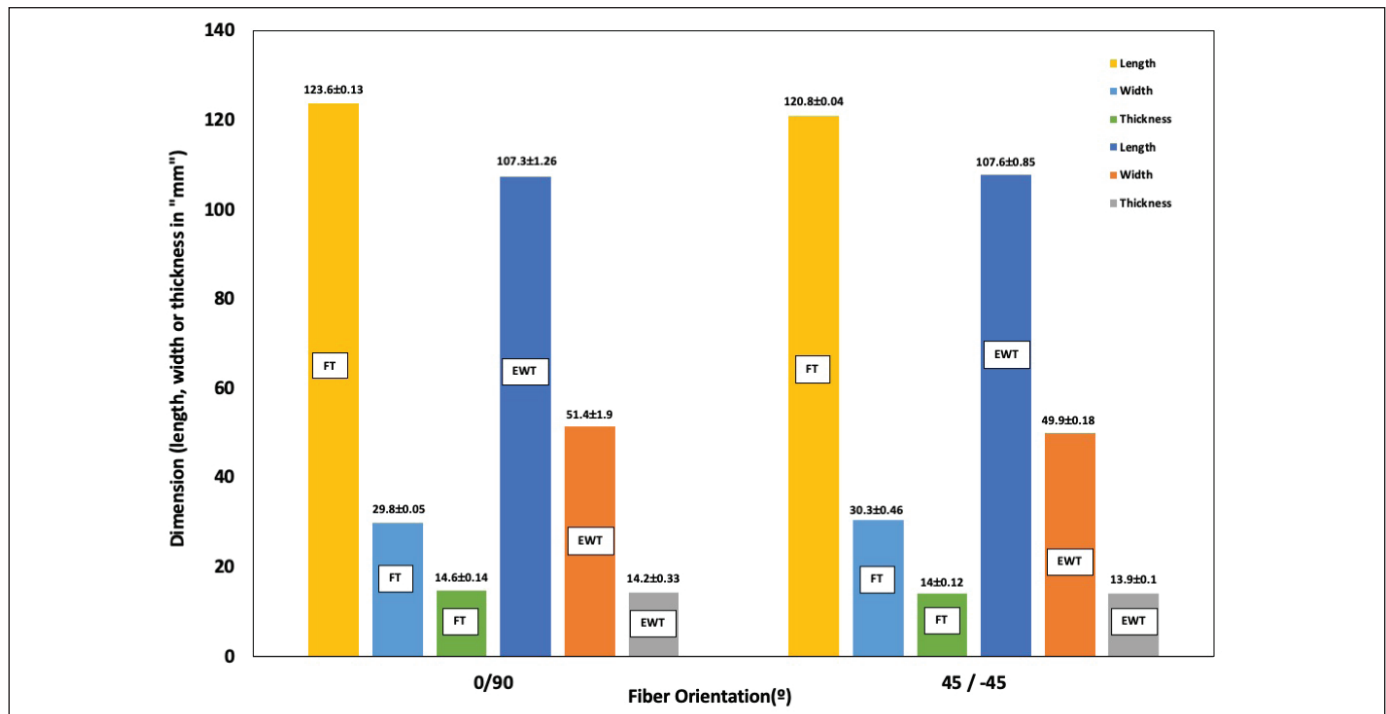


Figure 2. Average dimensions of sandwich composite samples' (length, width and thickness) in "mm" scale in conjunction with \pm standard deviations (FT: flexural test and EWT: edgewise test).

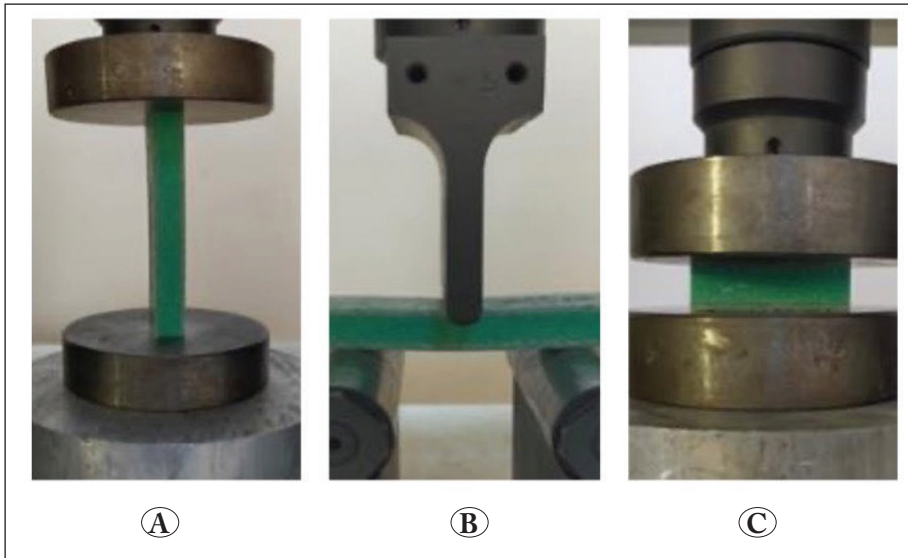


Figure 3. A) Edgewise compression test, B) flexural test with three-point bending (3PB) apparatus, C) flatwise compression test.

Table 1. Applied test types and characteristic equations used for parameter calculations

Test Type	ASTM Standard	Characteristic Equation(s)
Flatwise compression	ASTM C-365	$\sigma_{FW}^{ult} = \frac{F_{max}}{A}$ $E_{FW} = \frac{\left(\frac{F_{max}}{\delta}\right) \times t}{A}$
Flexural	ASTM C-364	$\sigma_f = \frac{F_{max} \times L}{2t(d+c)b}$ $\sigma_{cs} = \frac{F_{max}}{(d+c)b}$
Edgewise compression	ASTM C-393	$\sigma_{EW}^{ult} = \frac{F_{max}}{w(2t)}$

tively while L is the span length in flexural test, and specified as 70 mm with regard to related ASTM standard. The b and w sequentially symbolize the width in flexural and EW compression tests. Additionally, F_{max} and δ in FW test were determined as the maximum force matching to the maximum strain (ϵ) in compression of 0.002 and corresponding displacement (Ferreira et al. 2016).

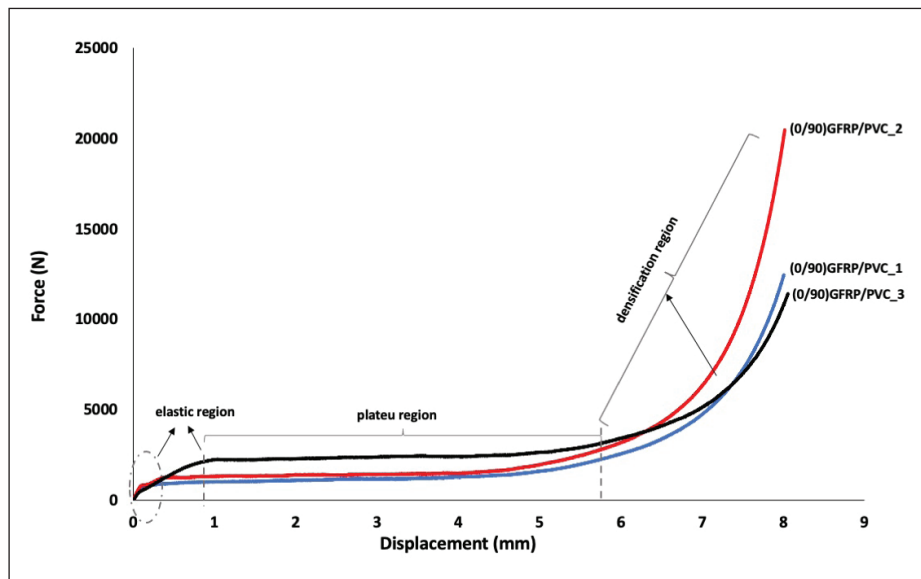
3. Results and Discussions

The flatwise compressive properties of PVC foam-based sandwich structures were performed to determine the modulus and strength values under that loading direction. As expressed in the previous section, FW test is a core dominated test, therefore both of those parameters referred above basically reflect the core characteristics. The force-displacement ($F-\delta$) graphs of (0/90) GFRP/PVC sandwich composites

are shown in Figure 4 and the resultant properties such as FW strength (σ_{FW}^{ult}) and modulus (E_{FW}) are given in Table 2. As it is known that the foams and foam based sandwiches exhibit three different zones and the typical curves are seen in Figure 4. In the first zone (elastic region), the force increases linearly in a short period of time while it almost shows no variation in the second zone (plateau region). In the final stage (densification regime), force dramatically increases with a sharp slope due to the ending of foam cell collapsing, which results in the formation of foam densification (Mane, et al. 2017). Based on Table 2, average strength and stiffness values were calculated as 0.39 ± 0.047 MPa and 19.66 ± 2.35 MPa, respectively by considering 0.002 strain. Additionally, it can be clearly concluded that there is no significant variation in terms of those parameters among the samples, which indicates relatively homogeneous flatwise characteristics.

Table 2. Calculated FW and EW compression test parameters

Sample ID	σ_{FW}^{ult} (MPa)	E_{FW} (MPa)	σ_{EW}^{ult} (MPa)	SAE (kJ/kg)
(0/90) GFRP/PVC_1	0.35	17.47	73.77	0.47
(0/90) GFRP/PVC_2	0.44	22.16	72.64	0.28
(0/90) GFRP/PVC_3	0.38	19.36	56.94	0.21
(+45/-45) GFRP/PVC_1	-	-	68.97	0.43
(+45/-45) GFRP/PVC_2	-	-	67.93	0.32
(+45/-45) GFRP/PVC_3	-	-	65.78	0.42

**Figure 4.** Force-displacement graphs of (0/90)GFRP/PVC sandwich composites.

EW compression properties were determined regarding to the test graphs plotted in Figure 5. To explicitly specify the main differences between 0/90 and +45/-45 oriented composite face-sheets, force-displacement curves are separately shown in the same figure as 5 (a) and (b). As it is seen, all samples initially exhibit a linear curve up to the maximum value and a dramatic force decrease is observed after the top point. Face-sheet dominates the EW test (Lei, et al. 2016), therefore the deformation patterns of sandwiches containing those materials are shown in Figure 6(a) and (b), respectively. Due to the local bending of face-sheets, buckling phenomena occurred and debonding between GFRP and PVC through the edges of the panels touching to the crossheads was monitored. This situation is corresponding to the ending of linear zones in Figure 5(a) and (b). On the compressive side of the specimens, failure took place between core and skin, which can be attributed to the shear force acting at the interfacial region (see Figure

6). It is also noteworthy that none of the GFRP materials delaminated during the test. According to Table 2, average EW compression strength values of (0/90)GFRP/PVC and (+45/-45)GFRP/PVC sandwich composites were calculated as 67.79 ± 9.40 MPa and 67.56 ± 1.62 MPa, respectively. Although the forces carried by the samples with different GFRP skins showed a bit of variations, it can be concluded that (0/90) and (+45/-45) oriented glass fabrics displayed quite similar performance under EW compression direction. With regard to specific absorbed energy (SAE) parameter calculated under EW loading, the +45/-45 fiber orientation exhibited nearly 21% higher average value (0.39 ± 0.061 kJ/kg) as compared with cross-ply fiber sequence (0.32 ± 0.14 kJ/kg). Although, it is quite difficult to find and compare the parameter evaluation for the similar and/or same cases in literature, some studies related with this work have been analysed. For instance, Mamalis et al. (2005) investigated the buckling response of polymer foam core/GFRP face-sheet

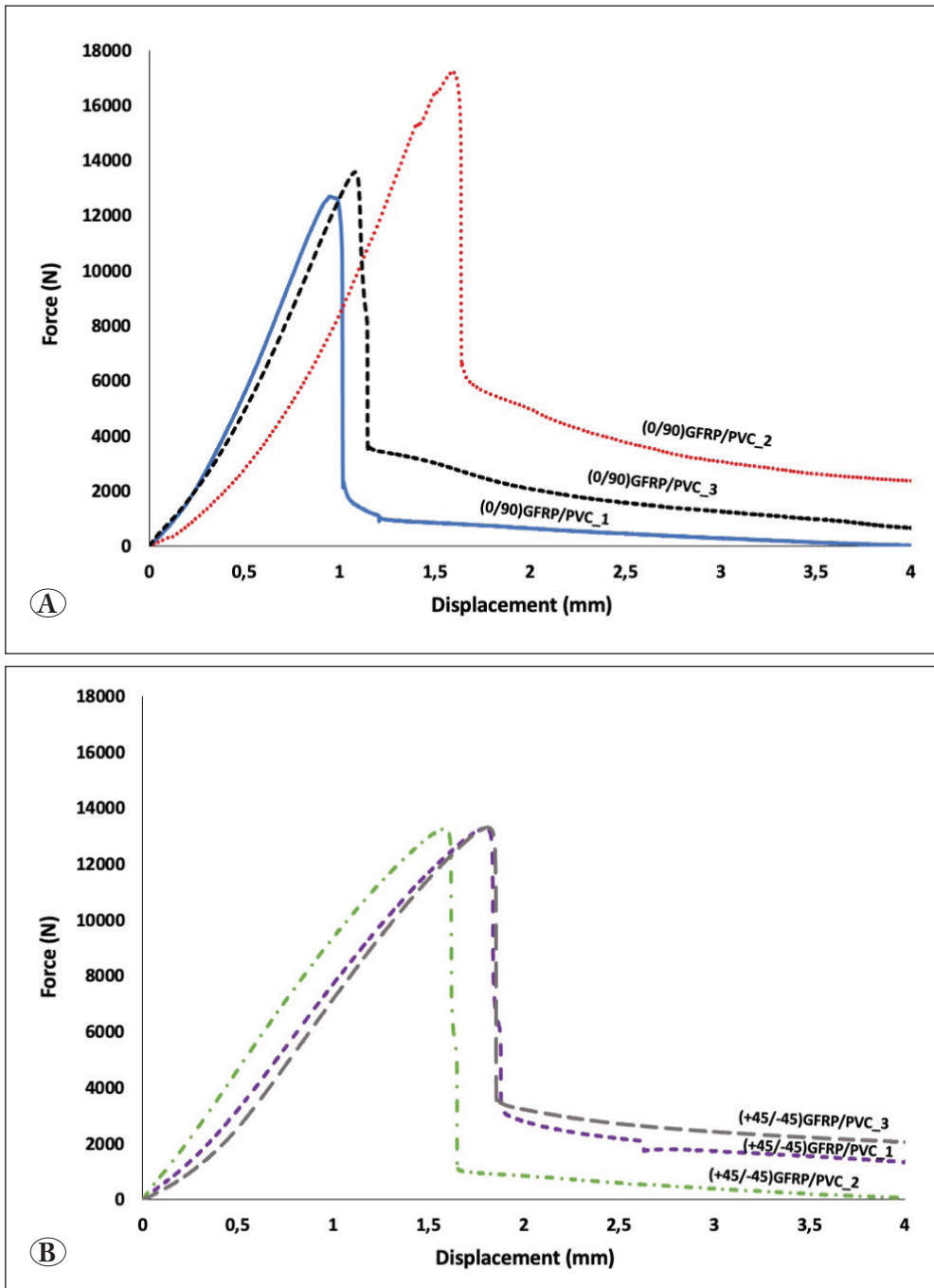


Figure 5. Edgewise force-displacement graphs of (A) (0/90)GFRP/PVC and (B) (+45/-45)GFRP/PVC sandwich composites.

sandwich structures under edgewise loading. They concluded that three main collapsing mechanisms were present in sandwich panels: unstable sandwich column buckling with foam core shear failure (mode I), unstable sandwich disintegration with buckling of faceplates to opposite directions (mode II) and progressive end-crushing of the sandwich panels (mode III). Ding et al. (2018) examined the hygroscopic ageing behaviors of PVC foam core (with 80 kg/m³ density and 10 mm thickness) bonded glass fibre reinforced

vinylester composite skin sandwich samples. Based on their EW test results, they observed not only local wrinkling but also global buckling, which is also seen in this study. Garray et al. (2016) compared the effects of 0/90 bidirectional plain weave E-glass cloth and E-glass fiber mat reinforced PVC or PET foam sandwich composites. Since the buckling is highly dependent on the face-sheet properties, PVC/E-glass cloth attained the highest strength and exhibited mode I and mode II with respect to layer thickness.

Flexural tests were performed to determine the critical failure forces and deformation mechanisms under out of plane loading. Three or four point bending configurations are generally utilized to generate flexural loading. It is known that core material resist shear forces while the top and bot-

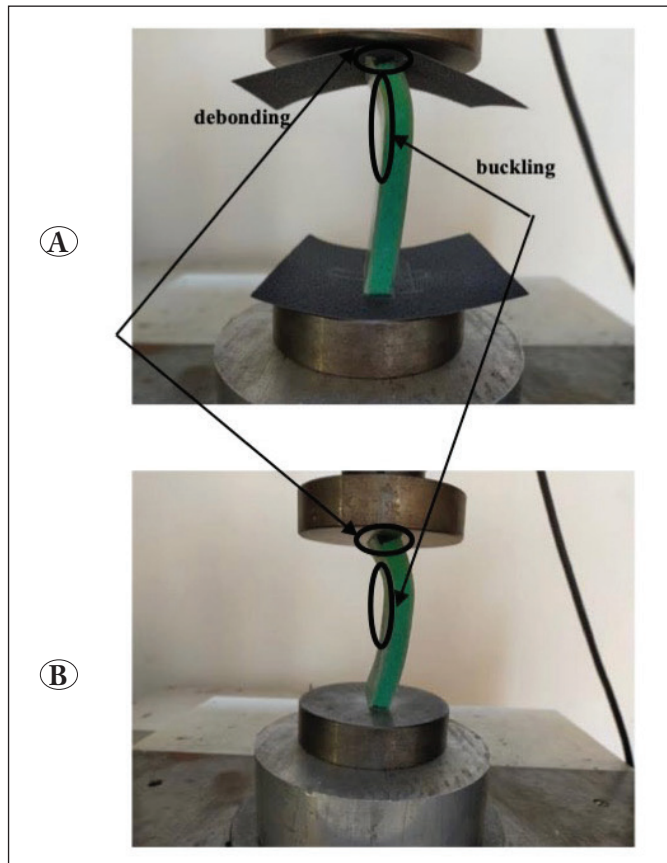


Figure 6. Deformation images of samples under EW compression loading at 2 mm displacement for (A) (0/90)GFRP/PVC and (B) (+45/-45)GFRP/PVC sandwich composites.

tom face-sheets restrict the effect of forces under tensile and compression directions. Specific failure modes are observed during this test such as face yielding, core shear, face wrinkling and core indentation (Jaliu et al. 2022, Balcioglu, 2018; Kaboglu, et al. 2018). The load-displacement graphs of 0/90 and +45/-45 GFRP oriented PVC foam sandwich samples are given in Figure 7 (a) and (b), respectively. Independent of fiber orientation, a linear-elastic regime is followed by an elasto-plastic path until the maximum value of force. After that, an abrupt decrease of loading is observed due to the major failure(s) occurring in the samples. This type of behavior is consistent with the results present in the literature (Xia et al. 2018, Pareta et al. 2020). For 0/90 oriented GFRP structures, core crushing of foam and local bending of the compressive skin beneath the roller were observed as the common damage modes. Additionally, core shear and debonding of core-GFRP component were seen as the other failure mechanisms. In general, indentation of the top skin causes to the core crushing with the progress of flexural loading and a similar situation is present in those samples as well (see Figure 8-a). As observed in Figure 8 (a), sample 1 initially failed due to core shear, which led to the sudden drop of applied force, and core crushing took place as the secondary damage type. In sample 2, an extensive debonding between GFRP and PVC core is seen as well as face-sheet bending. The core crushing was the third failure appeared in the same sandwich specimen. The specimens contained +45/-45 oriented GFRP face-sheet usually exhibited local debonding beneath the upper roller followed by bending (see Figure 8-b). It is interestingly seen that only one sample (#3) showed core crushing and no shear cracking was observed.

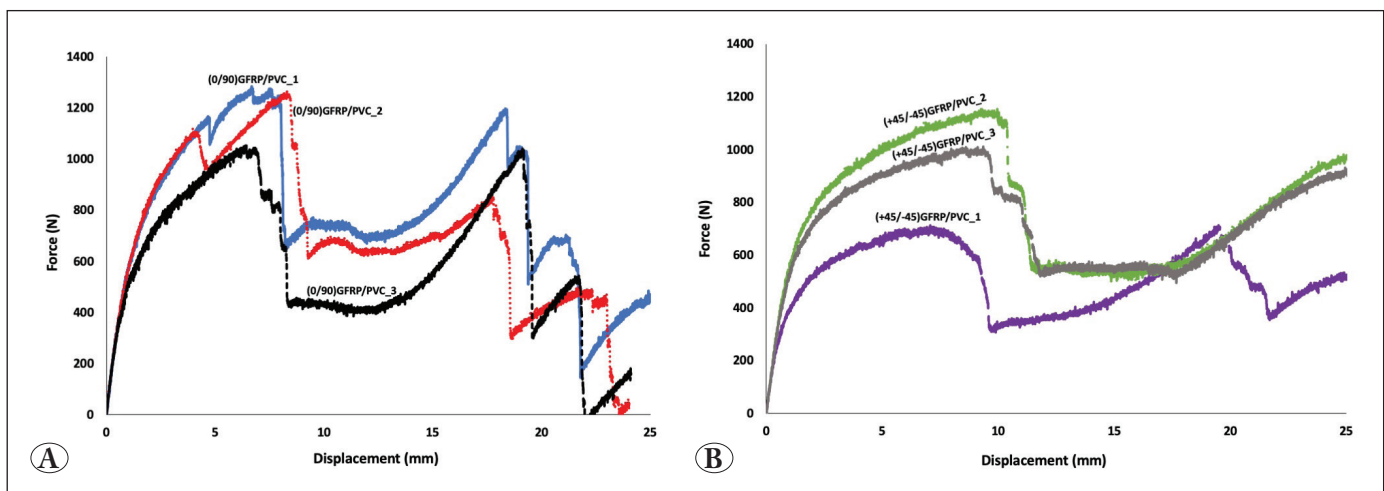
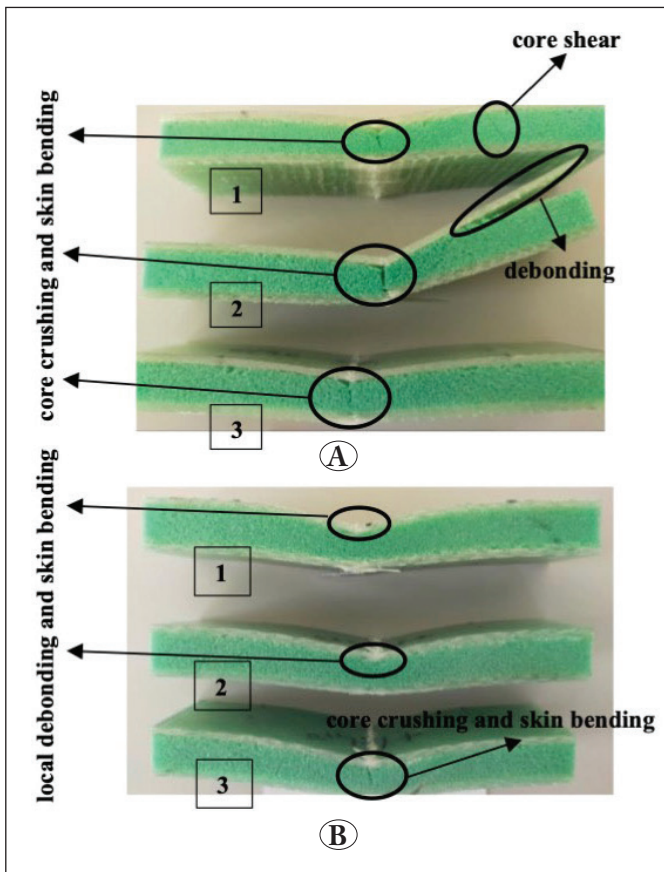


Figure 7. Flexural force-displacement graphs of (A) (0/90)GFRP/PVC and (B) (+45/-45)GFRP/PVC sandwich composites.

Table 3. Calculated flexural test parameters of sandwich composites

Sample ID	Failure load (N)	Peak displacement @failure load (mm)	σ_f (MPa)	σ_{cs} (MPa)	Failure load/weight (N/g)
(0/90) GFRP/PVC_1	1284.37	6.68	-	1.74	43.66
(0/90) GFRP/PVC_2	1265.62	8.30	25.96	-	43.45
(0/90) GFRP/PVC_3	1053.12	6.39	22.49	-	38.60
(+45/-45) GFRP/PVC_1	712.50	7.06	18.15	-	26.12
(+45/-45) GFRP/PVC_2	1153.12	9.29	27.86	-	41.25
(+45/-45) GFRP/PVC_3	1012.50	9.34	23.49	-	35.70

**Figure 8.** Failure modes of samples under flexural test for (A) (0/90)GFRP/PVC and (B) (+45/-45)GFRP/PVC sandwich composites.

Depending on the damage modes, face-sheet strength (σ_f) and core shear strength (σ_{cs}) parameters with maximum load and their corresponding displacement values are reported in Table 3. Except one specimen, all specimens showed skin bending as the main failure mechanism. The average σ_f values of (0/90)GFRP/PVC and (+45/-45)GFRP/PVC sandwich composites were calculated as 24.23 ± 2.45 MPa and 23.17 ± 4.86 MPa, respectively. It can be concluded

that the 0/90 fiber oriented GFRP skin slightly showed better strength values as compared with +45/-45 fiber oriented structures. By considering average peak displacements, it is observed that cross-ply introduced sandwich samples acquired to their maximum values (7.12 ± 1.03 mm) before +45/-45 fiber oriented specimens (8.56 ± 1.3 mm). The ratio of failure load to weight of the sandwich structures are also compared in the same table. The average values of that parameter for (0/90)GFRP/PVC and (+45/-45)GFRP/PVC samples were calculated as 41.90 ± 2.86 N/g and 34.35 ± 7.77 N/g, respectively. Based on that data, it is comprehended that cross-ply orientation provided improved results (approximately 22%↑) in terms of failure load/weight. Radhakrishnan and Mathialagan (2022) compared the flexural behavior of 0/+90/PET foam/-90/0, 0/+45/PET foam/-45/0 and 0/+30/PET foam/-30/0 sandwich structures. Based on their studies, it is concluded that the flexural strength values of whole samples exhibited close values with each other. However, of 0/+30/PET foam/-30/0 composite system achieved highest strength magnitude while 0/+90/PET foam/-90/0 panel exhibited the lowest strength. Dhaliwal (2021) concentrated on the flexural responses of carbon fiber reinforced polymer/polyurethane foam (CFRP/PU) and glass fiber reinforced polymer/polyurethane foam (GFRP/PU) sandwich beams. In that study, slightly higher stiffness and peak load level were observed for the sandwich specimens having woven CFRP facesheets as compared to the sandwich beam having cross ply GFRP skins. According to their test results it was interestingly revealed that, the variation of fiber type did not show a significant effect in terms of flexural characteristics.

4. Conclusions

The GFRP/PVC foam sandwich composites were manufactured with hand lay-up method. Both cross-ply (0/90) and (+45/-45) fiber orientation inside of GFRP face-sheets were

compared in terms of compression and flexural characteristics. The main conclusions are listed below:

- i. According to FW compression test, average elastic modulus and strength parameters of specimens were only calculated for (0/90)GFRP/PVC structures by considering 0.002 strain, to obtain foam core characteristics.
- ii. There was almost no variation for the EW compressive strength values of (0/90)GFRP/PVC and (+45/-45) GFRP/PVC sandwich composites. In terms of specific absorbed energy (SAE) parameter, the +45/-45 fiber orientation exhibited 21% higher average value than 0/90 fibre sequence, which provides higher toughness under edgewise loading.
- iii. For 0/90 oriented GFRP structures, core crushing of foam and local bending of the compressive skin beneath the roller were observed as the main failure modes under flexural loading. The specimens contained +45/-45 oriented GFRP face-sheet generally showed local debonding beneath the upper roller followed by bending. The average σ_f values of (0/90)GFRP/PVC and (+45/-45) GFRP/PVC sandwich composites were so close to each other while the average failure load/weight parameter of the latter sandwich group exhibited nearly 22% lower value than the cross-ply introduced specimen.

Acknowledgement

The author specially thanks to METYX™ company and Mrs. Bikem Direkçi for providing PVC foam core.

5. References

- ASTM C365, 2003.** Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores, ASTM.
- ASTM C364, 1999.** Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions, ASTM.
- ASTM C393/C393M, 2006.** Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, ASTM.
- Balcioglu, H.E. 2018.** Flexural Behaviors of Sandwich Composites Produced Using Recycled and Natural Material. *MJST*, 4(1): 64-73.
- Balıkoğlu, F., Demircioğlu, T.K., Ataş, A. 2022.** An Experimental Study on the Flexural Behaviour of Symmetric and Asymmetric Marine Composite Sandwich Beams. *J. Compos. Mater*, 56(15): 2311-2325.
- Balıkoğlu, F., Demircioğlu, T. K., Yıldız, M., Arslan, N., Ataş, A. 2020.** Mechanical Performance of Marine Sandwich Composites Subjected to Flatwise Compression and Flexural Loading: Effect of Resin Pins". *J. Sandw. Struct. Mater*, 22(6): 2030-2048.
- Calabrese, L., Di Bella, G., Fiore, V. 2016.** Manufacture of Marine Composite Sandwich Structures, In *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*, Woodhead Publishing, Cambridge, pp: 57-78.
- Crupi, V., Epasto, G., and Guglielmino, E. 2013.** Comparison of Aluminium Sandwiches for Lightweight Ship Structures: Honeycomb vs. Foam. *Mar. Struct*, 30: 74-96.
- Dhaliwal, G. S. 2021.** Characteristics of CFRP/PU foam and GFRP/PU sandwich beams having initial debond between facesheet and core. *SN Appl. Sci*, 3(3):1-11.
- Ding, A., Wang, J., Ni, A., Li, S. 2018.** Hygroscopic ageing of nonstandard size sandwich composites with vinylester-based composite faces and PVC foam core. *Compos. Struct*, 206:194-201.
- Ferreira, R., Pereira, D., Gago, A., Proença, J. 2016.** Experimental Characterisation of Cork Agglomerate Core Sandwich Panels for Wall Assemblies in Buildings. *J. Build. Eng*, 5: 194-210.
- Garay, A. C., Souza, J. A., Amico, S. C. 2016.** Evaluation of mechanical properties of sandwich structures with polyethylene terephthalate and polyvinyl chloride core. *J. Sandw. Struct. Mater*, 18(2): 229-241.
- Girish, V.K., and Mohandas, K.N. 2020.** Mechanical Characterization of Hybrid Sandwich Composites with Constant PU Foam Core Density. *IJMPERD*, 10 (3): 4679-4688.
- Jaliu, Z.Q., Dong, Zhu., Sun, W.B., Huang, Z.Q. 2022.** Flexural Properties of Lightweight Carbon Fiber/Epoxy Resin composite sandwiches with different fiber directions. *Mater. Res. Express*, 9 (2): 026506.
- Kaboglu, C., Yu, L., Mohagheghian, I. 2018.** Effects of the Core Density on the Quasi-static Flexural and Ballistic Performance of Fiber-Composite Skin/Foam-Core Sandwich Structures. *J. Mater. Sci*, 53: 6393-6414.
- Kosedag, E., Murat, Ay., Ekici, R. 2021.** Effect of stacking sequence and metal volume fraction on the ballistic impact behaviors of ARALL fiber-metal laminates: An experimental study. *Polymer Composites*, 43.3: 1536-1545.
- Kosedag, E., Caliskan, U., Ekici, R. 2022.** The effect of artificial aging on the impact behavior of SiC nanoparticle-glass fiber-reinforced polymer matrix composites. *Polymer Composites*, 43(2): 964-976.
- Kosedag E., Ekici R., 2021.** Free vibration analysis of foam-core sandwich structures. *Politeknik Dergisi*, 24(1): 69-74.

- Lei, H., Yao, K., Wen, W., Zhou, H., Fang, D. 2016.** Experimental and Numerical Investigation on the Crushing Behavior of Sandwich Composite Under Edgewise Compression Loading. *Compos. B. Eng*, 94: 34–44.
- Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B., Papapostolou., D. P. 2005.** On the crushing response of composite sandwich panels subjected to edgewise compression: experimental. *Composite structures*, 71(2): 246-257.
- Mane, J. V., Chandra, S., Sharma, S., Ali, H., Chavan, V. M., Manjunath, B. S., Patel, R. J. 2017.** Mechanical Property Evaluation of Polyurethane Foam under Quasi-static and Dynamic Strain Rates-An Experimental Study. *Procedia Eng*, 173: 726–731.
- Oterkus, E., Diyaroglu, C., De Meo, D., Allegri, G. 2016.** Fracture Modes, Damage Tolerance and Failure Mitigation in Marine Composites, In *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*, Woodhead Publishing, Cambridge, pp:79-101.
- Palomba, G., Epasto, G., Crupi, V. 2021.** Lightweight Sandwich Structures for Marine Applications: A Review. *Mech. Adv. Mater. Struct*, Ahead-of-Print, pp. 1-21.
- Pareta, A. S., Gupta, R., Panda, S. K. 2020.** Experimental Investigation on Fly Ash Particulate Reinforcement for Property Enhancement of PU Foam Core FRP Sandwich Composites. *Compos. Sci. Technol*, 195: 108207.
- Radhakrishnan, G., Mathialagan, S. 2022.** Effect of fiber orientation on mechanical behavior of glass fiber reinforced polyethylene terephthalate foam sandwich composite. *Mater. Today Proc.*62(2): 624-628.
- Samlal, S., Santhanakrishnan, R., Paulson, V., Goyal, C. 2020.** Flexural Property Evaluation of Foam Core Sandwich Panel with Carbon/Kevlar Epoxy Hybrid Facesheets. *Mater. Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.347>
- Shen, W., Luo, B., Yan, R., Zeng, H., Xu, L. 2017.** The Mechanical Behavior of Sandwich Composite Joints for Ship Structure. *Ocean Eng*, 144: 78-89.
- Uzay, Ç., Geren, N. 2020.** Effect of Stainless-Steel Wire Mesh Embedded into Fibre-Reinforced Polymer Facings on Flexural Characteristics of Sandwich Structures. *J. Reinf. Plast. Compos*, 39(15-16): 613-633.
- Xiao, Y., Hu, Y., Zhang, J., Song, C., Huang, X., Yu, J., Liu, Z. 2018.** The bending responses of sandwich panels with aluminium honeycomb core and CFRP skins used in electric vehicle body. *Adv. Mater. Sci. Eng*.



Çam Balı Takviyeli Kitosan Esaslı Aktif Filmler

Honey Incorporated Chitosan Based Active Films

Özge Kuyucak¹ , Pınar Terzioğlu^{1*} , Yusuf Sıcak² 

¹Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

²Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Köyceğiz Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Muğla, Türkiye

Öz

Yara örtüleri, özellikle kronik iyileşmeyen yaraların iyileşmesini hızlandırmada ve enfeksiyonu önlemede önemli rol oynamaktadır. Bal, biyouyumlu ve biyoaktiviteye sahip olduğu için modern klinik yara bakımı uygulamalarında değerlendirilmektedir. Son yıllarda, bal içeren polimer esaslı malzemelerin yara iyileşme sürecini destekleyen terapötik özelliğe sahip ideal adaylar olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada, çözelti döküm yöntemi kullanılarak çam balı (% 0-12,5) içeren kitosan esaslı filmler geliştirildi. Filmlerin morfolojisi ve yapısal özellikleri sırasıyla taramalı elektron mikroskobu ve Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektroskopisi (FT-IR) ile belirlendi. Filmlerin antioksidan aktivitesi dört farklı metot ile değerlendirildi. FT-IR spektrumları çam balının kitosan filmlere başarıyla dâhil edildiğini gösterdi. Bal ilavesi filmlerin antioksidan aktivitesini artırdı. Bu sonuçlar, çam balı içeren kitosan filmlerin yaraları tedavi etmek için faydalı etkilerinin olabileceğini göstermektedir. Bu filmler, ek testler ve spesifik klinik deneylerden sonra çeşitli yara türlerinde kullanılan potansiyel iyileştirici ajan olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Bal, Kitosan film, Biyoaktivite

Abstract

Wound dressings play an important role in accelerating the healing of chronic non-healing wounds and preventing infection. Honey is evaluated in modern clinical wound care applications due to having biocompatible and bioactivity. In recent years, it is thought that honey / polymer hybrid materials can be ideal candidates with therapeutic properties that support the wound healing process. In this study, chitosan based films containing pine honey (0-12.5%) were developed by solution casting method. The morphology and structural properties of the films were determined by scanning electron microscopy and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), respectively. The antioxidant activity of the films was determined by four different methods. The FT-IR spectra showed that pine honey was successfully incorporated into chitosan films. The addition of honey increased the antioxidant activity of the films. These results show that chitosan films containing pine honey would have beneficial effects to treat wounds. These films may be potential healing agents used in various types of wounds after additional tests and specific clinical trials.

Keywords: Honey, Chitosan film, Bioactivity


1. Giriş


Genel olarak, doku bütünlüğünün bozulması sonucunda ciltteki hasara yara denilmektedir. Yara tedavisi eski zamanlardan beri güncelliğini koruyan konulardan biridir (Güneş ve Eşer 2006). Yara iyileşmesi, doku rejenerasyonunun farklı

ve karmaşık biyokimyasal ve hücrel mekanizmalar ile gerçekleşmesidir. Yara örtüleri, yara iyileşmesinde yaygın olarak kullanılan medikal malzemelerdir. Geleneksel yara örtüleri (yara bandı, sargı bezi ve gazlı bez vb.) ile bakteri girişi önlenerek kuru ortamda yara iyileşmesi sağlanmaya çalışılmaktadır (Sasikala vd. 2018). Günümüzde ise bu yaklaşım neredeyse tamamen değişmiş ve yara iyileşmesinin belli oranda nemli ortamda daha iyi gerçekleştiği belirlenmiştir (Sasikala vd. 2018). İdeal bir yara örtüsünün sahip olması gereken özellikler sıralanacak olunursa, nemli bir yara iyileştirme ortamı oluşturmalı, aşırı eksüdayı emmeli, gaz değişimine izin vermeli ve yarada travmaya sebep olmaksızın kolayca çıkarılabilmelidir (Wang vd. 2012). Ayrıca, yara örtüsü an-

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: pinar.terzioğlu@btu.edu.tr

Özge Kuyucak  orcid.org/0000-0003-1999-1791

Pınar Terzioğlu  orcid.org/0000-0003-4114-7044

Yusuf Sıcak  orcid.org/0000-0003-2339-5837



tibakteriyel, biyoyumlu ve toksik olmayan özellikte olmalıdır (Stashak vd. 2004). Geleneksel yara örtülerine alternatif olarak yara iyileşme sürecini desteklemek için biyoaktif bileşen veya ilaç içeren modern yara örtüleri geliştirilmektedir (Abou-Okeil vd. 2018, López-Iglesias vd. 2019, Kheradvar vd. 2018). Bunun bir diğer sebebi de farklı yara çeşitlerine cevap verebilecek uygun malzemelerin üretilebilmesidir.

Son yıllarda, biyoyumlu polimerlerin yara iyileşmesindeki avantajlarının fark edilmesi ile bu polimerlerin etkili yara örtüsü geliştirilmesinde değerlendirilmesine yönelik pek çok araştırma yapılmaktadır. Kitosan, biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir biyopolimerdir. Doğal bir polisakkarit olan kitinden kısmi deasetilasyon yoluyla elde edilen kitosan, amino gruplarına sahip ve doğada selülozdan sonra en sık rastlanan biyopolimerdir (Shepherd vd. 1997). Kitosan, biyomalzemeler için istenen özellikler olan hemostaz, biyoyumluluk ve biyobozunurluk gibi önemli özelliklere sahiptir (Fan vd. 2009). Bakteri, mantar ve maya gibi farklı mikroorganizma gruplarına karşı antimikrobiyal etkiye sahip olması ve diğer birçok fonksiyonel özellikleri nedeniyle araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Dolayısıyla, yara tedavisi için ideal bir malzeme olduğu belirtilmiştir (Wang vd. 2012). Genellikle, hidrojel film şeklinde üretilerek yara bakım uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır (Boucard vd. 2007, Ribeiro vd. 2009).

Yüzyıllardan beri bal, insanoğlu için önemli besin kaynağı olarak tüketilmiştir. Geleneksel olarak bal, yara tedavisinde eski zamanlardan beri kullanılan bir doğal üründür. Balın biyoaktivitesi çapraz kontaminasyonu önler, nemli bir yara iyileşme ortamı sağlar, kötü kokuyu giderir, yara iyileşmesini destekleyen antibakteriyel ve antienflamatuvar etki mekanizmasını uyarır (Sasikala vd. 2018, Dunford vd. 2000).

Bal ayrıca bir antioksidan olarak da rol oynamaktadır. Balın bileşimi biyolojik aktivitesinde önemli rol oynar (Wahyuningtyas vd. 2018). Balda 200 çeşit civarında bileşen vardır. Bal yapısında bulunan aminoasitler, flavonoidler, fenolik asitler, enzimler mineraller, organik asitler ve vitaminler gibi fonksiyonel bileşenler sayesinde besleyici ve birçok hastalığa karşı koruyucu ve tedavi edici özelliğe sahip karbonhidrat açısından zengin bir gıdadır (Mutlu vd. 2017, Zhang vd. 2022). Balın bileşimi ise büyük ölçüde kaynağına ve üretildiği coğrafyaya bağlıdır (Wang vd. 2012). Türkiye, Dünya çam (salgı) balı üretiminin yaklaşık %92'sine sahip ve çam balı ihracatında dünyada birinci sıradadır. Türk Gıda Kodeksi Bal Tebliği'ne göre balın sahip olması gereken özellikler Çizelge 1'de sunulmaktadır. Coskun ve Karabulut-Dırıcan (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Muğla çam balının fizikokimyasal özellikleri incelendiğinde, pH, asitlik (meq/kg), brix (%), invert şeker (g/kg), sakaroz (g/kg), toplam şeker (g/kg) değerleri sırasıyla 4.81, 22, 26, 521.47, 121.28 ve 642.95 olarak bulunmuştur (Coskun ve Karabulut-Dırıcan 2019). Ayrıca, Muğla çam ballarının diastaz sayısının ~ 7-22, toplam fenolik madde miktarının 234 - 394 mg/100 g arasında değiştiği ve molibden, bor, kalsiyum, demir, potasyum, magnezyum, manganez, sodyum, fosfor ve çinko gibi önemli mineralleri içerdiği belirlenmiştir (Akbulut vd. 2009).

Bal sıvı olduğu için direkt olarak yaralı bölgeye uygulandığında cilt sıcaklığında daha akışkan hale gelmesi nedeniyle vücudun her bölgesinde kullanımı kısıtlanmaktadır. Buna ilaveten, sıvılaştıran balın sızması gerekli terapötik konsantrasyonun yeterli bir süre boyunca korunmasında zorluklara yol açmaktadır (El-Kased vd. 2017). Bu olumsuzluklar balın uygun bir polimerin matrisine ilavesi ile ortadan kaldırılabilir.

Çizelge 1. Türk Gıda Kodeksi Bal Tebliği'ne (2020/7) göre balın sahip olması gereken özellikler

Özellik (100 g balda)	Salgı balı	Çiçek balı
Nem (en fazla, %)	20	20
Sakkaroz (en fazla, g)	5	5
Fruktoz + glikoz (en az, g)	45	60
Maltoz (en fazla, %)	4	4
Diastaz sayısı (en az)	8	8
Prolin miktarı (en az, mg/kg)	300	300 Çiçek balının türüne göre değişmektedir.
Balda protein ve ham bal $\delta^{13}\text{C}$ değerlerinden hesaplanan C4 şekerleri oranı (en fazla, %)	7 Çam balında bu kriter aranmaz	7

Bal, yara iyileşmesi için uygunluğundan dolayı ticari olarak mevcut yara örtülerinde kullanılmaktadır (Yusof vd. 2007). Yeni Zelanda'ya özgü bir bal olan Manuka (*Leptospermum scoparium*) ve çiçek balı kullanılarak polimer esaslı yara örtü malzemeleri geliştirilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur (Wang vd. 2012, Arslan vd. 2014). Manuka balı içeren aljinat yara örtüleri Activon – Manuka Honey dressings ve MANUKAhd® ticari ürünleri olarak piyasada bulunmaktadır.

Son yıllarda, Türkiye'de üretilen balları içeren nanolif esaslı yara örtülerinin geliştirilmesi ile ilgili farklı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, çiçek balı/polietilen tereftalat/kitosan (Arslan vd. 2014), çam balı/polivinil alkol/jelatin (Parin vd. 2021a) ve çam balı/borik asit/poliamid 6 (Parin vd. 2021b) esaslı geliştirilen malzemeler uygun yapısal özellikleri nedeniyle potansiyel yara örtüsü malzemeleri olarak önerilmiştir. Fakat literatürde çam balı katkılı polimer film esaslı medikal malzeme geliştirilmesine yönelik herhangi bir bilimsel makale mevcut değildir. Bu çalışmada, çam balı içeren kitosan esaslı filmler çözelti döküm yöntemi ile geliştirildi. Farklı oranlarda bal içeren kitosan esaslı filmlerin yapısal, morfolojik, şişme ve antioksidan aktivite özellikleri incelendi.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Malzemeler

Filmlerin hazırlanmasında, kitosan (deasetilasyon derecesi $\geq 75\%$, Sigma-Aldrich), asetik asit (%100, Isolab), gliserol (%85, Isolab) ve Muğla çam balı (Balcı Gökmen) kullanıldı. Balın özellikleri; nem %15, pH 4,20, prolin değeri 489 mg/kg ve diastaz aktivitesi 11'dir.

2.2. Balın LC-TOF-MS Analizi

Çam balının kimyasal içeriği, TOF (6210 Time of Flight) dedektörü ile birleştirilmiş 1260 Infinity HPLC Sistemi (Agilent Technologies) cihazı ile belirlendi. Bal numunesi enjeksiyon öncesinde PTFE filtreden (0.45 μm) geçirildi. Bileşikler ayırmak için Poroshell 120 EC-C18 (27 mm, 4.0x50 m, Agilent Technologies) kullanıldı. Kolon sıcaklığı, akış hızı ve enjeksiyon hacmi sırasıyla 35°C, 0.6 mL/dk ve 5 μL olacak şekilde analiz gerçekleştirildi. TOF analizi negatif iyon modunda analiz edildi. Analiz gaz sıcaklığı, 325°C; kurutma gazı akışı, 10 mL/dk; fragman voltajı, 175 V' da gerçekleştirildi. Mobil faz, su (A) ve asetonitril (B) içinde %0.1 formik asetik asitten oluşmaktadır. Gradyan 0-1 dakikada %10 B, 1-20 dakikada %50 B, 20-23 dakikada %80 B, 23-25 dakikada %10 B, 25-30 dakikada %10 B.

Çizelge 2. HPLC-TOF/MS yöntemi ve tanımlama için kullanılan standartların alıkonma süreleri ve MS/MS parametreleri

Analit	m/z ^a [M-H] ⁻	Alıkonma süresi
Fumarik asit	115.0130	3,17
Gentisik asit	153.0297	4,50
Klorojenik asit	353.1060	5,48
Protokateşik asit	153.0296	7,10
Sirinjik asit	197.0580	8,08
Salisilik asit	137.0344	13,11

^a İyon (m/z) [M-H]⁻: Standart bileşiklerin moleküler iyonları (kütle-yük oranı)

2.3. Filmlerin Hazırlanması

Kitosan çözeltisi (ağırlıkça %2), kitosanın seyreltik asetik asit çözeltisinde (%1 v/v) manyetik karıştırıcıda 50°C'de homojen çözelti elde edilinceye kadar karıştırılarak hazırlandı. Sonra çözeltiye sodyum bikarbonat çözeltisi (% 5, 5 mL) damla damla ekledi. Başka bir tarafta bal distile su (20 mL) ile iyice çözümlenerek seyreltildi. Seyreltilen bal (0-12,5 g) kitosan çözeltisine eklenerek yarım saat boyunca 40°C'de karıştırıldı. Son aşamada çözeltiye gliserol (0.5 mL) eklendi ve bir gece boyunca karıştırıldı. Film çözeltisi teflon kalıplara (18 cm) dökülerek 40°C'de 48 saat kurutuldu. Çizelge 2'de verilen 5 farklı kompozisyona sahip film üretimi gerçekleştirildi. Numuneler 0/ 2,5/ 5/ 7,5/10 ve 12,5 g bal içeriğine göre sırasıyla KB0, KB1, KB2, KB3, KB4 ve KB5 şeklinde isimlendirildi.

2.4. Filmlerin Karakterizasyonu

Filmlerin yapısında bulunan fonksiyonel grupların karakterizasyonu FT-IR spektrofotometresi (NICOLET - IS50) ile 400-4000 cm^{-1} aralığında ve 4 cm^{-1} çözünürlükte gerçekleştirildi.

Filmlerin morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (Carl Zeiss Gemini 300, Almanya) kullanılarak gözlemlendi. Vakum buharlaştırıcı ile numuneler altın ve paladyum ile kaplandı.

Filmlerin suda şişme özelliklerini belirlemek için numuneler 2x2 cm ebatlarında kesilerek etüvde 37°C'de 24 saat kurutulduktan sonra tartıldı (W_0). Daha sonra numuneler 25°C'de distile suya daldırılarak 24 saat sonra tartıldı ($W_{\text{şişen}}$). Filmlerin distile su içindeki şişme değerleri denklem 1 kullanılarak hesaplandı.

$$\% \text{ Şişme} = \frac{W_{\text{şişen}} - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

Filmlerin antioksidan aktivitesi dört farklı konsantrasyonda (6.25, 12.5, 25 ve 50 µg/mL) yapıldı. Antioksidan aktivitelerinin karşılaştırılmasında pozitif standart olarak alfa-tokoferol (α-TOC) ve bütül hidroksi toluen (BHT) kullanıldı.

Filmlerin, toplam antioksidan aktivite tayini β-karoten-linoleik asit renk açılımını ifade eden linoleik asitin oksidasyona uğramasıyla konjuge dien hidroperoksitlerinin ölçülmesine dayanan yöntem kullanılarak tespit edildi (Marco 1968, Öztürk vd. 2007). DPPH (1,1-difenil-2-pikrilhidrazil) serbest radikal süpürücü aktivite tayini için Blois (1958) tarafından geliştirilen metot kullanıldı. ABTS katyon radikali giderim aktiviteleri ve Cu (II) indirgeme gücü sırasıyla Re vd. (1999) ve Apak vd.(2004) metotlarına göre tespit edildi.

3. Bulgular

3.1. Filmlerin Yapısal Özellikleri

Çam balına ait FT-IR spektrumu incelendiğinde (Şekil 1) bala ait karakteristik pikler tespit edildi. Bala ait spektrumda, 3266 cm⁻¹'de -OH gerilme titreşimi ve C-H gerilme, 1640 cm⁻¹'de C=O gerilme ve amit I'in N-H bükülme, 1026 cm⁻¹'de C-O ve C-C gerilme, 900-700 cm⁻¹'de C-H eğilme titreşimi görüldü (Parin vd. 2021a, Gok vd. 2015).

Kompozit filmleri oluşturan kitosan ve bal arasındaki etkileşimleri belirlemek amacıyla gerçekleştirilen FT-IR analizi sonucu elde edilen spektrumlar Şekil 2'de gösterilmektedir. Kitosan esaslı filme (KB-0) ait spektrumda, C-N (1151 cm⁻¹), C-O bağı gerilme titreşimi (1257 ve 1324 cm⁻¹), C-H eğilme (1403 cm⁻¹), amino grubu (NH³⁺, 1548 cm⁻¹), C=O gerilme (amit I, 1648 cm⁻¹) ve C-H gerilme titreşimi (2934 ve 2873 cm⁻¹) karakteristik pikleri olduğu tespit edildi. Benzer sonuçlara literatür çalışmalarında da rastlanmıştır (Mazloom-Jalali vd. 2020, Priyadarshi vd. 2018, Siripatrawan ve Vitchayakitti 2016, Gómez-Chabala 2017). 1110-1040 cm⁻¹ aralığındaki bant, kitosan halka yapısındaki CO gerilmesine karşılık gelmektedir (Priyadarshi vd. 2018). Ayrıca, 3200-3400 cm⁻¹ bant aralığında birincil amin (-NH) gerilme ve -OH gerilme titreşimleri görülmektedir (Gómez-Chabala 2017, Escárcega-Galaz 2018).

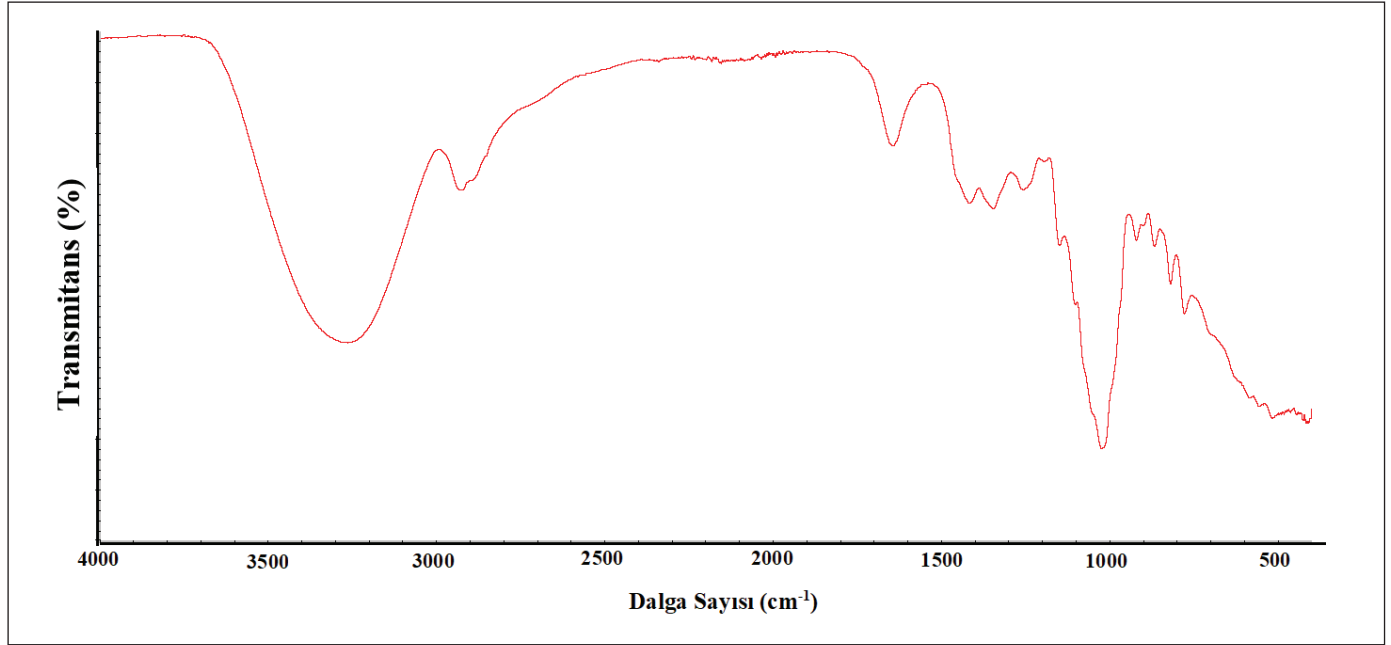
Bal içeren kompozit filmlere ait spektrumlar kitosan esaslı kontrol filmine ait spektrum ile karşılaştırıldığında bazı yeni pikler oluşurken bazı piklerin kaybolduğu tespit edildi. Bal içeren filmlerde (KB1-KB5) 817 cm⁻¹ ve 776

cm⁻¹'de karbonhidratlardaki C-O ve C-C gerilmesi (Pataca vd. 2007, Nguyen vd. 2019) ve C-H eğilme titreşiminin sakkarit konfigürasyonlarını temsil eden (Nguyen vd. 2019, Gok vd. 2015) yeni küçük pikler meydana geldiği belirlendi. Ayrıca, kontrol filminde 648, 620 ve 556 cm⁻¹'de yer alan piklerin kompozit filmlerde kaybolduğu tespit edildi. Bu değişimlere ilaveten 1648 cm⁻¹'deki pikin hafifçe daha küçük dalga boyuna (~1643 cm⁻¹) kaydığı görüldü. 1548 cm⁻¹'deki pikin ve 1403 cm⁻¹'deki pikin daha yüksek dalga boyuna (1562 ve 1409 cm⁻¹, sırasıyla) kaydığı ve pik yoğunluklarının azaldığı belirlendi. Bu iki pik yoğunluğundaki azalışın genel olarak artan bal miktarı ile artması, yüksek miktarda bal ilavesi ile bal-polimer etkileşimlerinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Tüm bu değişimler balın polimer matrisine başarılı bir şekilde dâhil olduğunu göstermektedir. Benzer sonuçlar potansiyel biyoaktif yara örtüsü olarak kullanılmak üzere geliştirilen Akasya balı içeren Aljinat/Polivinil alkol esaslı nanolif esaslı malzemelerde de tespit edilmiştir (Tang vd. 2019).

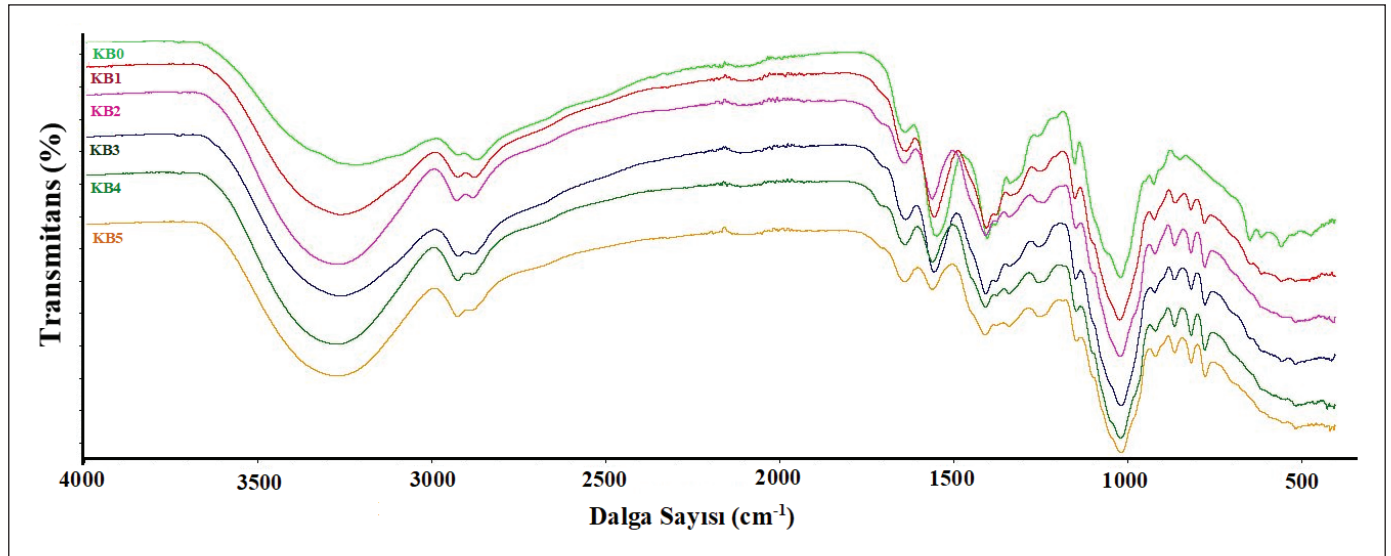
3.2. Filmlerin Şişme Davranışı

Şişme kapasitesi, özellikle eksüdasyon yaralarında yara örtülerinin önemli bir özelliğidir. Yüksek sıvı tutma kapasitene sahip yara örtüleri şişerek orta dereceli yara eksüdalarını emebilirler. Bu da iyileşme sürecine yardımcı olan yarı kuru bir yara yatağının oluşmasına yol açar (El-Kased vd. 2017).

Kitosanın su tutması yapısında bulunan hidrofilik gruplar (hidroksil ve amino grupları) ile ilgilidir (Kamel vd. 2017). Kompozit bir filmde ise numune matrisinin hidrofilitesi ve su tutmaya eğilimi ile birlikte matris bileşenlerinin çapraz bağlanma derecesi gibi pek çok parametre malzemenin şişme davranışına etki etmektedir (Khaleghi vd. 2018). Sadece kitosan esaslı filmin yapısına farklı oranlarda bal katıldığında filmlerin şişme davranışında düşme meydana geldi. Plastikleştirici olarak kullanılan gliserol ile kitosanın etkileşimi sonucunda yüksek şişme değeri elde edilirken, matrikse balın eklenmesi sonucunda plastikleştirici ile polimerin etkileşimi azaldığı için şişme oranında azalma meydana gelmektedir (Sasikala vd. 2018). Ayrıca bal-polimer etkileşiminden dolayı daha sıkı bir yapının oluşması sonucunda şişme oranlarında düşme meydana geldi. Bu etkileşimler, kitosan zincirlerinin hareketliliğini kısıtlayarak suyun difüzyonunu azaltmıştır (Kamel vd. 2017). Filmlerin artan bal miktarına bağlı olarak artan oranda şişme davranışı gösterdiği belirlenmiştir (Çizelge 2). Bu durum balın hidrofilik yapısından kaynaklanmaktadır (Sasikala vd. 2018). Artan oranda hidrofilik gruplar ile su molekülleri arasında hidrojen bağı



Şekil 1. Balın FT-IR spektrumu.



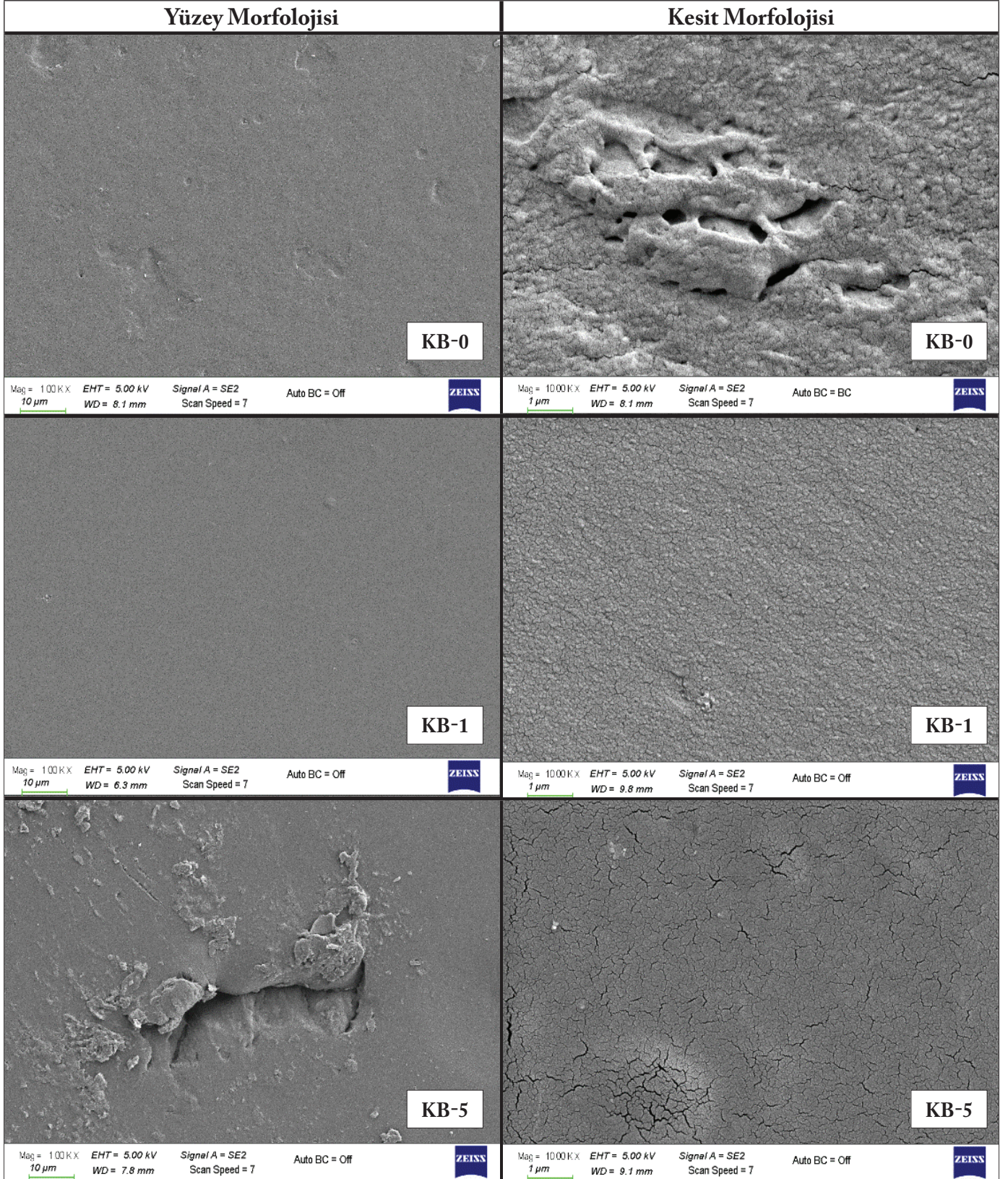
Şekil 2. Filmlerin FT-IR spektrumu.

oluşmuştur. Bu çalışmada hazırlanan KB-5 filmi, nemli bir iyileşme ortamına ihtiyaç duyan nekrotik ve kabuklu yara gibi düşük derecede eksüdalı yaralarının tedavisi için değerlendirilebilir (Afshari, vd. 2015). Bu filmler sıvı ile doyduklarında değiştirilmelidir.

3.3. Filmlerin Morfolojisi

Filmlerin yüzey ve kesit morfolojisi Şekil 3'de verilmektedir. Yüzey morfolojileri incelendiğinde sadece kitosan esaslı olan filmin yüzeyinin hemen hemen homojen bir görüntüye

sahip olduğu ve KB-1 örneğinde yüzey homojenliğinin arttığı belirlendi. En yüksek oranda bal içeren KB-5 örneğinin yüzeyinin heterojen olduğu ve çatlak oluştuğu gözlemlendi. Filmlerin kesit morfolojisinin birbirinden farklı olduğu belirlendi. Sadece kitosan esaslı filmde gözenekler gözlemlendi. Bal ilavesi ile ara yüzey uyumluluğunun arttığı belirlendi. KB-1 filmi daha pürüzsüz bir kesite sahipken, KB-5 filmi kesiti incelendiğinde küçük çatlakların bulunduğu tespit edildi. Neres-Santos vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Polivinil alkol/Jelatin/Manuka Balı esaslı çapraz



Şekil 3. Filmlerin SEM mikrografları.

bağlı jeller geliştirilmiştir. Yapılan SEM incelemesi sonucunda sadece Polivinil alkol/Jelatin esaslı numunelerin kesit yüzeyinde 3 katmanlı yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Bal içeren örneklerde ise muhtemelen balın numune gözeneklerinde yer alması nedeniyle farklı katmanları ayırt etmenin zor olduğu belirtilmiştir.

Yapılan çalışmalarda bir filmdeki gözeneklerin yeterli gaz geçirgenliği sağladığı, hücre büyümesini iyileştirdiğini ve besin ve atık ürünlerinin değişimini kolaylaştırdığını bildirilmiştir (Bierhalz vd. 2016, Depan vd. 2011).

3.4. Filmlerin Antioksidan Aktivitesi

Yara iyileşmesi sırasında antioksidan seviyesinin artması ile yara iyileşme sürecini hızlandırmak için doğal antioksidanlar tercih edilmektedir (Bölgen vd. 2020). Aşırı miktardaki reaktif oksijen türleri ve mikrobiyal enfeksiyon yara iyileşme süreci için ana zorluklardır. Antioksidan ajanlar, hücre içi reaktif oksijen türlerinin üretimini azaltmakta ve nitrik oksit üretimini zayıflatmaktadır (Bölgen vd. 2020). Bu yüzden antioksidan özelliğe sahip yara örtülerinin geliştirilmesi ve uygulamasına yönelik ilgi her geçen gün artmaktadır. Bal fenolikler, flavonoidler, karotenoidler, proteinler, organik asitler, amino asitler, vitaminler (B1, B2, B3, B9, B12, C) ve Maillard reaksiyon ürünleri gibi zengin biyoaktif bileşenlere sahip olduğu için antioksidan aktiviteye sahip olduğu bilimsel literatürde yer almaktadır (Sıcak vd. 2021, Vela vd. 2007, Nasuti vd. 2006). Ayrıca, çam balı gibi salgı ballarının pek çok çiçek balından daha yüksek antioksidan aktiviteye sahip olduğu belirtilmiştir (Pita-Calvo vd. 2017).

Filmlerin dört farklı metot ile belirlenen antioksidan aktivitelerinin IC_{50} ($\mu\text{g/mL}$) değerleri Çizelge 3'de gösterilmektedir. Bal ilave edilen filmler kontrol filmi ile kıyaslandığında daha iyi aktivite gösterdi. KB-1 filmi, β -karoten-linoleik asit, DPPH serbest radikal giderim, ABTS katyon radikal giderim ve CUPRAC kapasitesi aktivitesinde en aktif film olarak tespit edildi. β -karoten-linoleik asit aktivitesi ve ABTS katyon radikali giderim aktivite test verilerine göre, KB-1 filmi testin standardı olarak kullanılan α -TOC ve BHT'den daha az aktivite sergilerken DPPH radikali giderim aktivitesi test verilerine göre BHT'den ve CUPRAC aktivitesi test sonuçlarına göre α -TOC'den çok daha iyi aktivite sergiledi. Tang vd. (2019) tarafından yapılan çalışmanın sonucunda da benzer bulgular ile karşılaşılmıştır. Çalışmada, Aljinat/Polivinil alkol esaslı nanolif esaslı malzemelere akasya balı ilavesi ile DPPH serbest radikal giderim aktivitesinde artış meydana geldiği raporlanmıştır.

Ayrıca, bu çalışmada, çam balının kimyasal bileşenleri fumarik asit, gentisik asit, klorojenik asit, protokateşik asit, şirinjik asit ve salisilik asit şeklinde sırasıyla 90,1, 136,2, 169,2, 128,5, 135,2 ve 46,3 mg/kg bal olarak belirlendi. Literatür çalışmalarında fumarik asit (Basha vd. 2020), klorojenik asit (Song vd. 2022) ve salisilik asit (Oh vd. 2021), katkılı hidrojellerin yara iyileştirme uygulamaları için umut vadeden malzemeler olabileceği ileri sürülmüştür. Bir diğer çalışmada protokateşik asitin antioksidan, adeziv ve antiinflatuar etkisi sayesinde enjekte edilebilir jelatin aşıllı protokateşik asit ve oksitlenmiş dekstran kompozit hidrojelinin cilt yenilenmesi için yara örtüsü olarak kullanılabilirliği belirtilmiştir.

Çizelge 3. Filmlerin antioksidan aktivite ve şişme davranışı sonuçları

Numune	Film çözeltisi bileşiminde bal miktarı (g)*	Antioksidan Aktivite				Şişme (%)
		β -karoten-linoleik asit (IC_{50} $\mu\text{g/mL}$)	DPPH aktivitesi (IC_{50} $\mu\text{g/mL}$)	ABTS+ aktivitesi (IC_{50} $\mu\text{g/mL}$)	CUPRAC kapasitesi ($A_{0,5}$ $\mu\text{g/mL}$)	
KB-0	0	50,12±0,28	39,27±0,81	41,09±0,67	35,28±0,02	80,2±5,2
KB-1	2,5	34,29±0,40	21,03±0,47	30,34±0,19	20,13±0,00	3,3±1,5
KB-2	5	36,51±0,72	23,64±0,92	32,56±0,12	22,26±0,00	4,7±0,8
KB-3	7,5	39,18±0,33	29,31±0,30	35,07±0,38	27,67±0,00	6,6±0,7
KB-4	10	41,80±0,41	30,09±0,99	39,15±0,85	29,90±0,01	17,3±2,1
KB-5	12,5	43,25±0,61	31,77±0,60	40,01±0,17	33,04±0,01	45,3±3,4
α -TOC	-	4,48±0,14	12,30±0,11	4,91±0,51	40,61±0,01	-
BHT	-	2,39±0,29	54,87±0,42	2,98±0,62	4,03±0,03	-

*Her bir çözeltide 2 g/100 mL kitosan ve 0,5 mL gliserol bulunmaktadır.

tir (Liang vd. 2022). Bu çalışmalarında balın zengin içeriği sayesinde yara örtüleri için uygun bir katkı maddesi olma potansiyelini desteklediği düşünülmektedir.

Elde edilen sonuçları genel olarak özetlemek gerekirse bu çalışmada, yara iyileşmesine yararlı etkileri ile bilinen çam balının kitosan esaslı filmlere eklenmesinin filmlerin yapısal, fiziksel, antibakteriyel ve antioksidan özellikleri üzerine etkisi incelendi. Morfoloji çalışmaları bal ilavesi ile ara yüzey uyumluluğunun arttığını gösterdi. FT-IR analizi, kitosanın fonksiyonel grupları ile bal arasında etkileşimin oluştuğunu gösterdi. Bu çalışmada gerçekleştirilen antioksidan aktivite testleri değerlendirildiğinde bal ilaveli tüm filmler sadece kitosan esaslı (kontrol) filminden daha yüksek β -karoten-linoleik asit, DPPH serbest radikal giderim, ABTS katyon radikal giderim ve CUPRAC kapasitesi aktivitesi gösterdi. Böylelikle, elde edilen filmlerin ilave çalışmalar yapıldıktan sonra yaralar için potansiyel yara örtü malzemesi olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

4. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-B Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destek Programı kapsamında desteklenmiştir (Başvuru numarası: 1139B411900084). Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz. Projede destek olduğu için Doç. Dr. Gülsüm AYDIN'a teşekkür ederiz. Antioksidan çalışmaları için laboratuvar imkânı sağladığı için Prof. Dr. Mehmet ÖZTÜRK'e teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

- Abou-Okeil, A., Fahmy, HM., El-Bisi, MK., Ahmed-Farid, OA. 2018.** Hyaluronic acid/Na-alginate films as topical bioactive wound dressings. *Eur. Polym. J.*, 109:101-109.
- Afshari, MJ., Sheikh, N., Afarideh, H. 2015.** PVA/CM-chitosan/honey hydrogels prepared by using the combined technique of irradiation followed by freeze-thawing. *Radiat. Phys. Chem.*, 113:28-35.
- Akbulut, M., Özcan, MM., Çoklar, H. 2009.** Evaluation of antioxidant activity, phenolic, mineral contents and some physicochemical properties of several pine honeys collected from Western Anatolia. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 60(7):577-589.
- Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M., Karademir, SE. 2004.** Novel total antioxidant capacity index for dietary polyphenols and vitamins C and E, using their cupric ion reducing capability in the presence of neocuproine: CUPRAC method. *J. Agric. Food Chem.*, 52: 7970-7981.

- Arslan, A., Şimşek, M., Dalkıranoğlu-Aldemir, S., Kazaroğlu, NM., Gümüşderelioğlu, M. 2014.** Honey-based PET or PET/chitosan fibrous wound dressings: effect of honey on electrospinning process. *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.*, 25 (10): 999-1012.
- Basha, S.I., Ghosh, S., Vinothkumar, K., Ramesh, B., Kumari, PHP., Mohan, K.V. M., Sukumar, E. 2020.** Fumaric acid incorporated Ag/agar-agar hybrid hydrogel: A multifunctional avenue to tackle wound healing. *Mater. Sci. Eng. C*, 111:110743.
- Bierhalz, ACK., Westin, C.B., Moraes, AM. 2016.** Comparison of the properties of membranes produced with alginate and chitosan from mushroom and from shrimp. *Int. J. Biol. Macromol.*, 91:496-504.
- Blois, M.S. 1958.** Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature*, 181 (4617):1199-1200.
- Boucard, N., Vitona, C., Agayb, D., Maric, E., Rogerc, T., Chancerelleb, Y., Domard, A. 2007.** The use of physical hydrogels of chitosan for skin regeneration following third-degree burns. *Biomaterials*, 28(24): 3478-3488.
- Bölgen, N., Demir, D., Yalçın, MS., Özdemir, S. 2020.** Development of Hypericum perforatum oil incorporated antimicrobial and antioxidant chitosan cryogel as a wound dressing material. *Int. J. Biol. Macromol.*, 161: 1581-1590.
- Coskun, F., Karabulut-Dirican, L. 2019.** Effects of pine honey on the physicochemical, microbiological and sensory properties of probiotic yoghurt. *Food Sci. Technol., Campinas*, 39(Suppl. 2): 616-625.
- Depan, D., Girase, B., Shah, JS., Misra, RDK. 2011.** Structure-process-property relationship of the polar graphene oxide-mediated cellular response and stimulated growth of osteoblasts on hybrid chitosan network structure nanocomposite scaffolds. *Acta Biomater.*, 7(9): 3432-3445.
- Dunford, C., Cooper, R., Molan, P. 2000.** Using honey as a dressing for infected skin lesions. *Nurs. Times*, 96:7-9.
- El-Kased, RF., Amer, RI., Attia, D., Elmazar, MM. 2017.** Honey-based hydrogel: In vitro and comparative In vivo evaluation for burn wound healing. *Sci. Rep.*, 7: 9692.
- Escárcega-Galaz, AA., Sánchez-Machado, DI., López-Cervantes, J., Sanches-Silva, A., Madera-Santana, TJ., Paseiro-Losada, P. 2018.** Mechanical, structural and physical aspects of chitosan-based films as antimicrobial dressings. *Int. J. Biol. Macromol.*, 116: 472-481.
- Fan, M., Hu, Q., Shen, K. 2009.** Preparation and structure of chitosan soluble in wide pH range. *Carbohydr. Polym.*, 78 (1):66-71.
- Gok, S., Severcan, M., Goormaghtigh, E., Kandemir, I., Severcan, F. 2015.** Differentiation of Anatolian honey samples from different botanical origins by ATR-FTIR spectroscopy using multivariate analysis. *Food Chem.*, 170: 234-240.

- Gómez-Chabala, LF., Cuartas, CEE., López, MEL. 2017.** Release Behavior and Antibacterial Activity of Chitosan/Alginate Blends with Aloe vera and Silver Nanoparticles. *Mar. Drugs*, 15:328.
- Güneş, YÜ., Eşer, İ. 2006.** Nemli yara iyileşmesi ve oklüsif pansumanların yara iyileşmesindeki önemi. *Cumhuriyet Üniversitesi Hemşirelik Yüksekokulu Dergisi*, 10 (2):57-65.
- Kamel, NA., Abd El-Messieh, SL., Saleh, NM. 2017.** Chitosan/banana peel powder nanocomposites for wound dressing application: Preparation and characterization. *Mater. Sci. Eng. C*, 72: 543-550.
- Khaleghi, M., Mani, F., Salimi, H., Hajibeygi, M., Pashazadeh, R., Zayerzadeh, E., Babanejad, N., Shabaniyan, M. 2018.** Synthesis and characterization of new honey incorporated double-network hydrogels based on poly(vinyl alcohol) and acylated chitosan. *Adv. Polym. Technol.*, 37(8):3596-3606.
- Kheradvar, SA., Nourmohammadi, J., Tabesh, H., Bagheri, B. 2018.** Starch nanoparticle as a vitamin E-TPGS carrier loaded in silk fibroin-poly(vinylalcohol)-Aloevera nanofibrous dressing. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 166: 9-16.
- Liang, J., Zhang, K., Li, J., Su, J., Guan, F., Li, J. 2022.** Injectable protocatechuic acid based composite hydrogel with hemostatic and antioxidant properties for skin regeneration. *Mater.Des.*, 222:111109.
- López-Iglesias, C., Barros, J., Ardao, I., Monteiro, FJ., Alvarez-Lorenzo, C., Gómez-Amoza, JL., García-González, CA. 2019.** Vancomycin-loaded chitosan aerogel particles for chronic wound applications. *Carbohydr. Polym.*, 204: 223-231.
- Marco, GJ. 1968.** A rapid method for evaluation of antioxidants. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 45(9):594-598.
- Mazloom-Jalali, A., Shariatnia, Z., Tamai, IA., Pakzad, SR., Malakootikhah, J. 2020.** Fabrication of chitosan-polyethylene glycol nanocomposite films containing ZIF-8 nanoparticles for application as wound dressing materials. *Int. J. Biol. Macromol.*, 153:421-432.
- Mutlu, C., Erbaş, M., Tontul, SA. 2017.** Bal ve Diğer Arı Ürünlerinin Bazı Özellikleri ve İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri. *Akademik Gıda*, 15(1):75-83.
- Nasuti, C., Gabbianelli, R., Falcioni, G., Cantalamessa, F. 2006.** Antioxidative and gastroprotective activities of anti-inflammatory formulations derived from chestnut honey in rats. *Nutr. Res.*, 26:130-137.
- Neres-Santos, AM., Duarte-Moreira, AP., Piler-Carvalho, CW., Luchese, R., Ribeiro, E., McGuinness, GB., Fernandes-Mendes, M., Nunes-Oliveira, R. 2019.** Physically Cross-Linked Gels of PVA with Natural Polymers as Matrices for Manuka Honey Release in Wound-Care Applications. *Materials*. 12(4):559.
- Nguyen, HTL., Katopo, L., Pang, E., Mantri, N., Kasapis, S. 2019.** Structural Variation in Gelatin Networks From Low to High-Solid Systems Effected by Honey Addition. *Food Res. Int.*, 121: 319-325.
- Oh, GW., Kim, SC., Kim, TH., Jung, WK. 2021.** Characterization of an oxidized alginate-gelatin hydrogel incorporating a COS-salicylic acid conjugate for wound healing. *Carbohydr. Polym.*, 252:117145.
- Öztürk, M., Aydoğmuş-Öztürk, F., Duru, ME., Topçu, G. 2007.** Antioxidant activity of stem and root extracts of Rhubarb (*Rheum ribes*): An edible medicinal plant. *Food Chem.*, 103(2):623-630.
- Parin, FN., Terzioğlu, P., Sıcak, Y., Yildirim, K., Ozturk, M. 2021a.** Pine honey-loaded electrospun poly (vinyl alcohol)/gelatin nanofibers with antioxidant properties. *J. Text. Inst.*, 112(4):628-635.
- Parin FN., Terzioğlu, P., Parin, U., Yeşilyurt, A., Eroğlu, M., Yildirim, K. 2021b.** Fabrication of polyamide 6/honey/boric acid mats by electrohydrodynamic processes for wound healing applications. *Mater. Today Com.*, 29:102921.
- Pataca, LCM., Neto, WB., Marcucci, MC., Poppi, RJ. 2007.** Determination of Apparent Reducing Sugars, Moisture and Acidity in Honey by Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared Spectrometry. *Talanta*, 71(5):1926-1931.
- Pita-Calvo, C., Guerra-Rodriguez, ME., Vazquez, M., 2017.** Analytical methods used in the quality control of honey. *J. Agric. Food Chem.*, 65: 690-703.
- Priyadarshi, R., Kumar, SB., Negi, YS., 2018.** Chitosan film incorporated with citric acid and glycerol as an active packaging material for extension of green chilli shelf life. *Carbohydr. Polym.*, 195:329-338.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. 1999.** Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic. Biol. Med.*, 26: 1231-1237.
- Ribeiro, MP., Espiga, A., Silva, D., Baptista, P., Henriques, J., Ferreira, C., Silva, JC., Borges, JP., Pires, E., Chaves, P., Correia, IJ. 2009.** Development of a new chitosan hydrogel for wound dressing. *Wound Repair Regen.*, 17(6):817-824.
- Sasikala, L., Rathinamoorthy, R., Dhurai, B. 2018.** Optimization of process conditions for chitosan-manuka honey film as wound contact layer for wound dressings. *Wound Med.*, 23:11-21.
- Sıcak, Y., Şahin-Yağlıoğlu, A., Öztürk, M. 2021.** Bioactivities and phenolic constituents relationship of Muğla thyme and pine honey of Turkey with the chemometric approach. *Food Measure.*, 15: 3694-3707.
- Shepherd, R., Reader, S., Falshaw, A. 1997.** Chitosan functional properties. *Glycoconj. J.*, 14: 535-542.

- Siripatrawan, U., Vitchayakitti, W. 2016.** Improving functional properties of chitosan films as active food packaging by incorporating with propolis. *Food Hydrocoll.*, 61: 695-702.
- Song, L., Yang, H., Liang, D., Chu, D., Yang, L., Li, M., Yang, B., Shi, Y., Chen, Z., Yu, Z., Guo, J. 2022.** A chlorogenic acid-loaded hyaluronic acid-based hydrogel facilitates anti-inflammatory and pro-healing effects for diabetic wounds. *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, 70:103232.
- Stashak, TS., Farstvedt, E., Othic, A. 2004.** Update on wound dressings: Indications and bestuse. *Clin. Tech. Equine Prac.*, 3(2):148-163.
- Tang, Y., Lan, X., Liang, C., Zhong, Z., Xie, R., Zhou, Y., Miao, X., Wang, H., Wang, W. 2019.** Honey loaded alginate/PVA nanofibrous membrane as potential bioactive wound dressing. *Carbohydr. Polym.*, 219: 113-120.
- Türk Gıda Kodeksi Bal Tebliği (Tebliđ No:2020/7), 2020.** <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2020/04/20200422-13.htm>
- Vela, L., De Lorenzo, C., Pérez, RA. 2007.** Antioxidant capacity of Spanish honeys and its correlation with polyphenol content and other physicochemical properties. *J. Sci. Food Agric.*, 87:1069-1075.
- Wang, T., Zhu, XK., Xue, XT., Wu, DY. 2012.** Hydrogel sheets of chitosan, honey and gelatin as burn wound dressings. *Carbohydr. Polym.*, 88:75-83.
- Wahyuningtyas, ES., Iswara, A., Sari, Y., Kamal, S., Santosa, B., Ishijima, T., Nakatani, T., Putri, IK., Nasruddin, N. 2018.** Comparative study on Manuka and Indonesian honeys to support the application of plasma jet during proliferative phase on wound healing. *Clin. Plasma Med.*, 12:1-9.
- Yusof, N., Hafiza, AHA., Zohdi, RM., Bakar, MZA. 2007.** Development of honey hydrogel dressing for enhanced wound healing. *Radiat. Phys. Chem.*, 76 (11):1767-1770.
- Zhang, Q., Zhang, M., Wang, T., Chen, X., Li, Q., Zhao, X. 2022.** Preparation of aloe polysaccharide/honey/PVA composite hydrogel: Antibacterial activity and promoting wound healing. *Int. J. Biol. Macromol.*, 211:249-258.



Investigation of Strontium (II) Ions Adsorption onto Long Chain Quaternary Amine Cationic-Volcanite: Modeling and Optimization by RSM

Uzun Zincirli Kuaterner Amin Katyonik-Volkanit Üzerine Stronsiyum (II) İyonlarının Adsorpsiyonununun Araştırılması: RSM ile Modelleme ve Optimizasyon

Ümit H. Kaynar^{1*} , Sermin Çam Kaynar² 

¹Bakırca University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Fundamental Sciences, Menemen, Izmir, Turkey

²Celal Bayar University, Department of Physics, Manisa, Turkey

Abstract

In this study, kula volcanite with alkaline basaltic structure and abundant abundance was used for strontium removal by increasing its adsorption capacity with hexadecyltrimethylammonium (HDTMA) organic cation. First, the adsorbent was characterized by XRF, FT-IR and SEM. Then, the adsorption of Strontium (II) ions from aqueous solutions was measured with the ICP device and the experiments were optimized by the surface response method (RSM). Central composite design (CCD) method was used for the study planning in the experiments. The theoretically adsorbed Strontium (II) at optimum values in the study was calculated as 31.978 mg/g. In addition, compatibility of various isotherms and thermodynamic parameters were evaluated in the study. According to the results, it was concluded that this cheap and abundant adsorbent material can be effective in the separation and purification of radioactive wastes, and this structure can also be used in protective containers for the transport of wastes.

Keywords: Adsorption, Strontium (II), Quaternary amine, Response surface method (RSM)

Öz

Bu çalışmada, alkali bazaltik yapıda ve bol miktarda bulunan kula volkaniti, heksadesiltrimetilamonyum (HDTMA) organik katyonu ile adsorpsiyon kapasitesi artırılarak stronsiyum gideriminde kullanılmıştır. İlk olarak, adsorban XRF, FT-IR ve SEM ile karakterize edilmiştir. Daha sonra, sulu çözeltilerden Stronsiyum (II) iyonlarının adsorpsiyonu ICP cihazı ile ölçülmüş ve deneyler yüzey yanıt metodu (YYM) ile optimize edilmiştir. Deneylerdeki çalışma planlanması için merkezi kompozit tasarım (CCD) metodu kullanılmıştır. Çalışmada optimum değerlerde teorik olarak adsorbe edilen Stronsiyum (II) 31,978 mg/g olarak hesaplanmıştır. Ayrıca çalışmada, çeşitli izotermelerin uyumluluğu ve termodinamik parametreler değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, ucuz ve bol miktarda olan bu adsorban malzemenin radyoaktif atıkların ayrıştırılması ve arıtılmasında etkili olabileceği ve bu yapının aynı zamanda atıkların taşınması için koruyucu kaplarda da kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, Stronsiyum (II), Kuaterner amin, Yüzey yanıt metodu (YYM)


1. Introduction

Nowadays, when waste problems have reached great dimensions, studies on their removal from the environment and their recycling have increased. An important part of the work done in this area is the purification of metals from in-

dustrial wastewater. Particularly, radioactive and heavy metal wastes appear in different physical and chemical processes in many fields such as industry, medicine and scientific research in laboratories. Ion exchange, chemical precipitation, biosorption, adsorption etc. in the removal of heavy metals and radionuclides. methods such as these are still the most effective methods today. (Zhang et al. 2015; Shakur et al. 2016-a, b, c; Liu et al. 2016; Aghadavoud et al. 2016). Of these methods, the adsorption method has always been remarkable because it is cheap and effective to use, and the use of natural clays as inorganic adsorbent material. In order to increase the absorption of clays, the process of opening and

*Corresponding author: umit.kaynar@bakircay.edu.tr

Ümit H. Kaynar  orcid.org/0000-0002-3321-0341

Sermin Çam Kaynar  orcid.org/0000-0002-3022-4908



modifying the pores with various substances has been applied. Especially by washing with acidic and basic solutions, the sorption capacity, the effect of inorganic cations and the organoclays formed by modifying with organic cations have been increased (Saitoh et al. 2016). Long chain quaternary amine cationic salts, a class of organic cations, become more hydrophobic for adsorption of metal ions when loaded on clays. However, the structure changes from the hydrophilic silica surface to the organophilic surface. Long chain organic cations used in surface modification are easily attached to the surface by the electrostatic forces between the positive charges in their structures and the negative charges on the adsorbent surface (Xi et al. 2007; Ryu and Yeo 2010).

There are many studies on organic cation modification, especially on bentonite structures. The removal of Pb^{2+} and phenol ions from the aqueous solution to the clay structure modified with HDTMA was carried out. (Richards and Bouazza 2010; Uddin, 2017; Lee et al. 2002). According to Majdan et al. (2010) investigated uranium adsorption on organo bentonite modified with HDTMA. Sprynsky et al. (2010) investigated the ability of natural and organic cation-modified diatomite (HDTMA-diatomite) to remove U(VI) ions. In another study, the maximum sorption capacities for radionuclide U(VI) on natural and modified diatomite were found to be 25.63 $\mu\text{mol/g}$ and 667.40 $\mu\text{mol/g}$, respectively.

Strontium has 16 known isotopes. Sr has four naturally occurring stable isotopes (Sr-84, -86, r-87 and r-88). The other 12 are radioactive isotopes. Only Sr-90 has a sufficiently long half-life (29 years). All other radionuclides have half-lives less than 65 days. 90-Strontium decays to 90-yttrium (^{90}Y) by emitting beta particles, and ^{90}Y decays to 90-zirconium with a half-life of 64 hours, emitting a larger energetic beta particle. The main health risks for strontium relate to the energetic beta particle emitted from ^{90}Y . Strontium is the 15th most abundant element on Earth, with a value of 0.01%. It is the 10th most abundant element in sea water, with a value of 0.0008%. The Sr^{90} isotope is a product of fission in uranium and plutonium reactors and weapons. In addition, strontium compounds have been used in electro-ceramics, superconductors, magnets, ship and aircraft construction, military materials, navy, fireworks, and signal lights. The strontium ion has a low toxic effect (Hong et al. 2016). The chemical and biological behavior of strontium is similar to that of calcium. In the human body, it accumulates in bones and teeth. In addition, Sr^{90} , which is the radioisotope of strontium and has a half-life of 29.1 years, similarly

settles in the body and causes cancer. Strontium oxide and strontium hydroxide have irritating effects on the skin, mucous membranes and especially the eyes. Strontium lactate is known to deactivate growth and reduce bone mineralization (Wu et al. 2012; Landstetter and Wallner 2006; Grahek and Maćefat 2005).

As a multivariate statistical and mathematical technique, the RSM method is generally used for system optimization. In this method, it directs the experimental studies to determine the experimental optimum conditions and for a high performance. Especially in many experimental chemistry fields, time saving, cost reduction and determination of optimum conditions for the effect of various factors have been widely used recently. (Cojocar and Zakrzewska-Trznadel 2007; Kunwar et al. 2011; Aralkumar et al. 2011).

In this study, it was aimed to increase the adsorption capacity of the Kula volcanic in alkaline basaltic structure by modifying it with HDTMA organic cation. Volcanic modified with HDTMA was made for the absorption of Sr^{2+} in aqueous media. XRF, FT-IR and SEM analysis of the adsorbent structure were performed for its physical and chemical characterization. In the study, conditions such as pH, Sr^{2+} concentration, temperature and time for strontium (II) adsorption were determined and optimized using RSM. In addition, adsorption isotherms and thermodynamic data were evaluated.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

It is a volcanic alkali basalt structure used as an adsorbent in this study and was obtained from the volcanic region around Manisa-Kula. Kula volcanics are classified as basic according to their SiO_2 production rate and as basaltic according to their exit temperatures. Kula basaltic volcanics were chosen because they are abundant, cheap and accessible sorbent in nature. Cationic surfactants were prepared as a modified quaternary ammonium (alkyl aryl ammonium) compound from straight chain hexadecyltrimethylammonium (HDTMA)-bromide ($\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{NBr}$, MW: 364.46 g/mol, Sigma-Aldrich, 99%). Adsorption was carried out by the batch method and a thermostated GFL-1083 water bath agitator was used in the experiments.

2.2. Preparation of Organo-Volcanics

Before modification with organic cation, volcanic was taken from three different places in the extinct volcano region and thoroughly washed with pure water. After drying at 110 °C

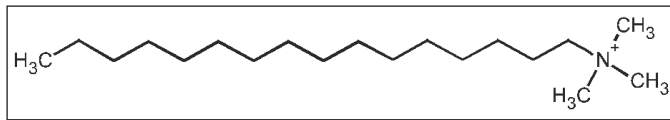


Figure 1. Structure of HDTMA organics molecule.

for 24 h, it is crushed in jaw crushers and lowered to the ground. Volcanics were prepared and dried by treating with 5, 10, 15 and 20 mM HDTMA salt solutions as an organic compound (organovolcanic). The molecular structure and surface binding types of HDTMA organic cation are shown in Figure 1. Structural characterization of organic modified volcanics was done with XRF, FT-IR and SEM/EDS.

2.3. Adsorption Studies

Adsorption of Sr^{2+} on modified volcanic samples was done using the batch method in a shaker. In this study, m (0.666 g) of modified volcanic sample adsorbent was shaken with 20 mL of Sr^{2+} solutions (20-100 mg/L) in test tubes (50 mL). And the supernatants were filtered. Sr^{2+} concentrations were determined before and after equilibration with ICP-OES (Perkin Elmer Optima 2000 DV). Single-element solutions containing individual Sr^{2+} were used to obtain the calibration curve. Q (mg/g) adsorption capacities of Sr^{2+} absorbed on HDTMA-Kula were determined by formula (1) at equilibrium and time.

$$Q = (C_0 - C_e) \times (V/m) \quad (1)$$

C_0 : the early Sr^{2+} concentration; C_e : the concentration of Sr^{2+} at equilibrium; t : time (t); V : the volume (L); m : weight of dry adsorbent (g).

The sorption activity is defined by the ion distribution coefficient K_d (mL/g) determined using the formula (2).

$$K_d = \frac{(C_0 - C_e)}{C_e} \times \frac{V}{m} \quad (2)$$

The sorption isotherms were studied by equilibration of 0.1 g HDTMA-organovolcanic with metal concentrations varying between 20 and 100 mg/L. The effect of tempera-

ture on Sr^{2+} sorption was investigated between 293 K and 313 K. ΔH° , ΔS° and ΔG° values were found.

2.4. Response Surface Methodology

RSM is a method, mathematical and statistical techniques that use quantitative data from symmetric experimental designs together to decide to run the conditions and regression model. In this method, RSM was used on the used response area to find a large number of sorption values. There are many methods for experimental design in RSM (Box Behnken Design “BBD”, Face Centered Design “CCF” and Central Composite Design “CCD”). CCD does the design for 5 different levels. In this study, the design of maximum Sr^{2+} adsorption was made by CCD method. For a quadratic surface, the CCD method is suitable. In this method, the active ingredients are optimized with the CCD method with a minimum number of experiments.

For a 2-level study, the total number of runs in this design is $2k+2k+n_0$ ($2k$, factorial runs; $2k$, axial work; k is given as the number of independent process variables and x_0 , center runs). The effect of the factors (X_1 : pH, X_2 : Sr^{2+} concentration, X_3 : temperature and X_4 : amount of adsorbent) was investigated at 5 levels. The independent variables and their coded CCD design levels are given in table 1.

Each run was an average of three repetitions [24].

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n b_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3)$$

where Y is the answer; b_0 , represents cutting; b_{ij} , coefficients; n , the amount of variable; x_i and x_j , arguments and ϵ represents error.

Optimum values of the variables, graphs and equation are found with RSM. The correlation coefficient (R^2) of the study was found to be high (0.99). The importance of the RSM model was evaluated for probability value (Probe > F) and F value.[25]

Table 1. Independence factors and their coded levels used for optimization.

Factors	Factor code	Range and levels (coded)				
		-2	-1	0	+1	+2
Initial pH	X_1	3	4	5	6	8
Sr^{2+} Concentration (mg/L)	X_2	20	40	60	80	100
Temperature (°C)	X_3	20	30	40	50	60
Time (min)	X_4	15	30	60	90	120

This works, the second-order polynomial equation can be given as followings: (4)

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4$$

Excel and Minitab 17 were used for the regression and graphical analysis of the data obtained in the study [26]

3. Result and Discussion

3.1. Characterization of HDTMA-Organo-Volcanics

According to Kula volcanic XRF results, the chemical composition of the original basaltic volcanic sample was SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, MnO, CaO MgO, Na₂O, TiO₂, K₂O and P₂O₅; 48.4% 8.648%; 17.66%; 0.085%; 6.234%; 8.538%; 3.989%; 1.85%, 2.881% and 0.625% respectively. Volcanics are divided into basalt groups according to the amount of SiO₂ (Fisher,1961).

Morphology as well as structural rearrangement of natural and modified volcanics are presented by SEM in Figure 1a and Figure 1b, respectively. SEM images of organic cation modified volcanites used as adsorbent were taken with QUANTA 400 F Field Emission-SEM and are given in Figure 2. EDS). Images are magnified 40000 times. It was

understood that the crystal sizes were in the micrometer scale. The carbon percentage in HDTMA organic-volcanic was calculated as 12.64%.

FT-IR spectra of crude and HDTMA-organovolcanics were recorded on a Perkin Elmer BX spectrometer operating in the 400-4000 cm⁻¹ range. The FT-IR spectra of the Kula volcanic are given in Figure 3. The peaks seen in the spectrum at 1031, 1390-1396 and 3385 cm⁻¹ are the frequency values of the stretching vibrations related to Si-O, C-N and O-H bonds respectively. Characteristic NH₂⁺, NH⁺ and N-H ammonium stretching vibrations are present around 2924 and 2845 cm⁻¹. IR data are in agreement with the literature (Majdan et al. 2010; Sprynskyy et. al. 2015).

The results obtained in this study were found to be compatible with the study obtained by other researchers (Sprynskyy et. al. 2015).

3.2. Experimental Design

3.2.1. The optimization of sorption parameters

Experiments were carried out under optimum conditions obtained with RSM. Effect of four different parameters (pH, Sr²⁺ concentration, temperature and time). Experimental planning in factorial order using the CCD method was determined by performing a total of 31 experiments,

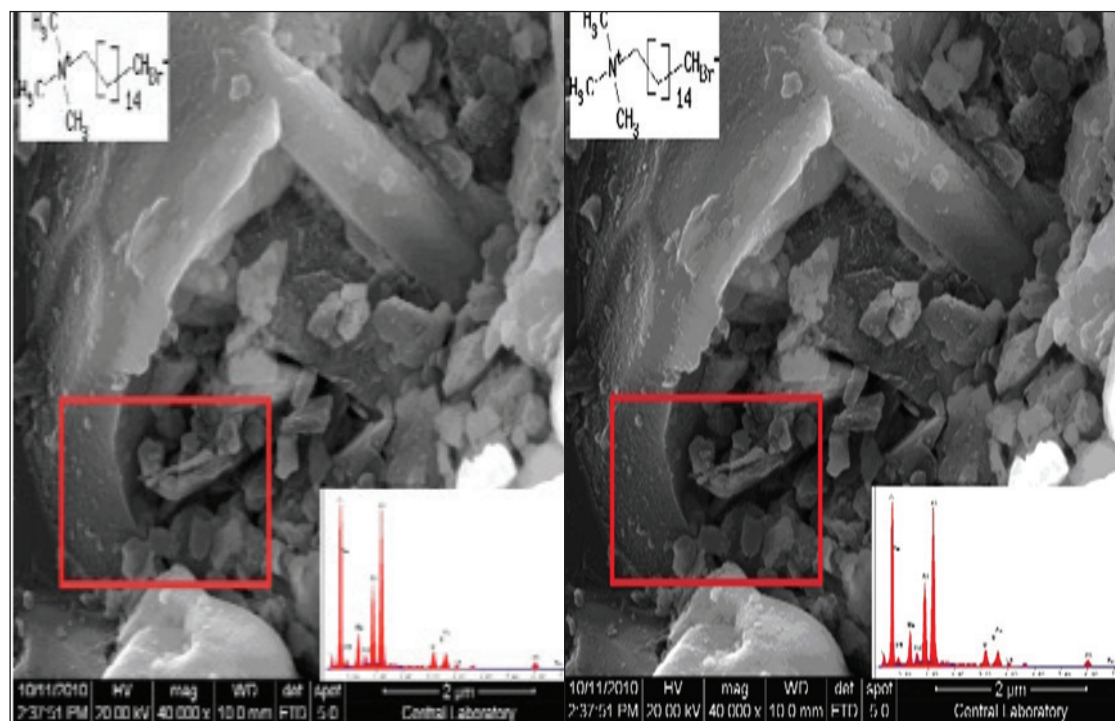


Figure 2. SEM images of the crude and HDTMA- organovolcanics and EDS distribution.

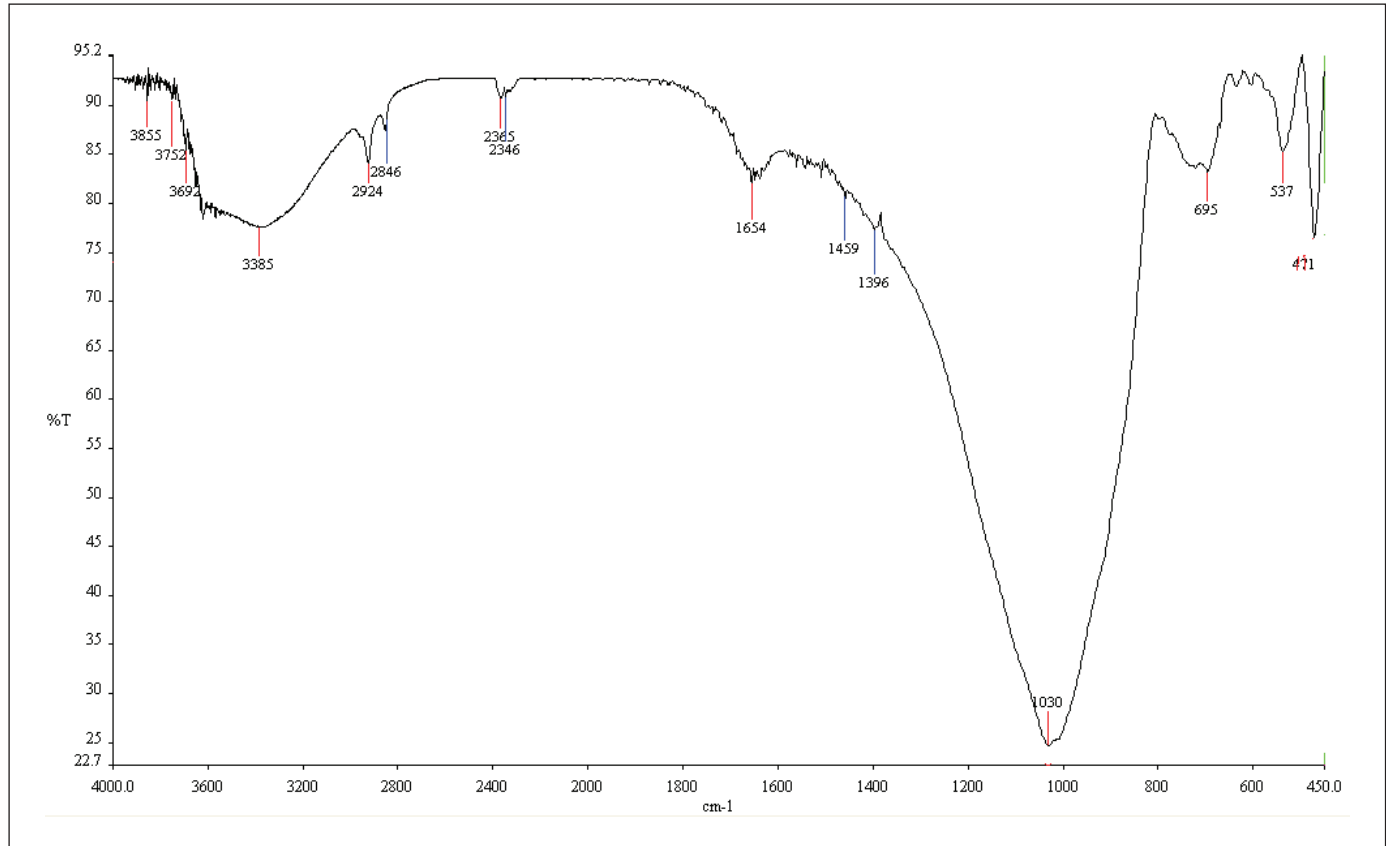


Figure 3. FT-IR spectra of HDTMA- organovolcanics.

some of which were at the central point, which is one of the RSM methods. The design matrix is shown in Table 2.

As a result of the evaluation of the obtained results, quadratic model (Eq.5) equality giving the amount of Sr^{2+} adsorbed is in the following.

Eq.5

$$Y \text{ (mg/g)} = 14.766 - 0.148 X_1 + 0.602 X_2 + 7.121 X_3 + 0.390 X_4 - 0.276 X_1X_1 - 0.666 X_2X_2 + 0.604 X_3X_3 - 0.212 X_4X_4 - 0.128 X_1X_2 - 0.072 X_1X_3 + 0.016 X_1X_4 + 0.038 X_2X_3 - 0.049 X_2X_4 + 0.059 X_3X_4$$

To check the statistical explanation of the above equation with a T-test, the second-order analysis of variance of the response surface (ANOVA) is given in Table 3. As the resulting F value was as large as 12.44, the experimental yields obtained by varying the factor levels were statistically significant at the 95% confidence limit. According to the result with probability value less than 0.0001, it is understood that the model is compatible. The R^2 and R^2_{adj} (0.96-0.92) values of the second order model calculated for the amount of adsorbed strontium (mg/g) are very close to 1. This result

shows that the experimental data are compatible with the values predicted by the model. Table 4 shows whether the coefficients of the model variables are significant, and the amount of strontium adsorbed (mg/g) is significant because the p value is less than 0.05 in the model (Sharma et al. 2009; Kaynar et al. 2015).

3.2.2 Response surface graphs

Three-dimensional surface graphs of the parameters affecting Sr^{2+} adsorption are given in Figure 4A-F.

When pH and time were evaluated together as three-dimensional surface graphs, it was observed that the amount of strontium adsorption on HDTMA organo-volcanic increased with increasing pH and decreased after a certain value (Figure 4A). The maximum value of adsorption capacity (Q) was determined as 15.22 mg/g in 95 minutes. A linear increase was observed when the changes in pH and initial strontium concentration were examined at constant temperature (40 °C) and adsorption time (67.5 min.). As seen in Figure 4B, it has been stated that it reaches 30 mg/g Q, especially at high concentrations. Changes depending on temperature and concentration at constant pH (5.5)

Table 2. Central Composite Cesign (CCD) model for Sr²⁺ adsorption by HDTMA-Organo- volcanics.

Run order	Coded values				Factors				Response (Y(mg/g))	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	pH	Conc.	Temp	Time	Observed value	Predicted value
1	1	1	1	1	6	80	50	90	22.85	22.05
2	1	1	1	-1	6	80	50	30	23.09	21.21
3	1	1	-1	1	6	80	30	90	6.86	7.75
4	1	1	-1	-1	6	80	30	30	7.10	7.16
5	1	-1	1	1	6	40	50	90	23.62	21.12
6	1	-1	1	-1	6	40	50	30	23.09	20.09
7	1	-1	-1	1	6	40	30	90	7.70	6.98
8	1	-1	-1	-1	6	40	30	30	7.97	6.19
9	-1	1	1	1	4	80	50	90	22.88	22.71
10	-1	1	1	-1	4	80	50	30	22.87	21.94
11	-1	1	-1	1	4	80	30	90	6.78	8.13
12	-1	1	-1	-1	4	80	30	30	7.05	7.60
13	-1	-1	1	1	4	40	50	90	22.98	21.27
14	-1	-1	1	-1	4	40	50	30	23.16	20.31
15	-1	-1	-1	1	4	40	30	90	6.92	6.84
16	-1	-1	-1	-1	4	40	30	30	6.96	6.11
17	2	0	0	0	8	60	40	60	10.31	13.37
18	-2	0	0	0	3	60	40	60	13.41	13.96
19	0	2	0	0	5	100	40	60	14.65	13.31
20	0	-2	0	0	5	20	40	60	5.95	10.90
21	0	0	2	0	5	60	60	60	26.31	31.43
22	0	0	-2	0	5	60	20	60	4.46	2.94
23	0	0	0	2	5	60	40	120	14.63	14.70
24	0	0	0	-2	5	60	40	15	9.61	13.14
25	0	0	0	0	5	60	40	60	14.97	14.77
26	0	0	0	0	5	60	40	60	14.64	14.77
27	0	0	0	0	5	60	40	60	14.98	14.77
28	0	0	0	0	5	60	40	60	14.75	14.77
29	0	0	0	0	5	60	40	60	14.75	14.77
30	0	0	0	0	5	60	40	60	14.62	14.77
31	0	0	0	0	5	60	40	60	14.66	14.77

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) for the regression model for Sr²⁺ adsorption efficiency.

ANOVA					
	Df	SS	MS	F	Probability F
Regression	14	1259.28	89.95	12.44	4.7E-06
Residuals	16	115.674	7.23		
Total	30	1374.96			

Multiple R² = 0.96, Adjusted R² = 0.92

Table 4. Estimated regression coefficient and corresponding t and P values.

Regression	Coefficients	Standart error	T	P
Intercept	14.766	1.016	14.529	1.2E-10*
X ₁	-0.148	0.549	-0.269	0.7911
X ₂	0.602	0.549	1.098	0.2886
X ₃	7.121	0.549	12.974	6.5E-10*
X ₄	0.390	0.549	0.710	0.4878
X ₁ X ₁	-0.276	0.503	-0.549	0.5906
X ₂ X ₂	-0.666	0.503	-1.325	0.2039
X ₃ X ₃	0.604	0.503	1.202	0.2468
X ₄ X ₄	-0.212	0.503	-0.421	0.6795
X ₁ X ₂	-0.128	0.672	-0.191	0.8511
X ₁ X ₃	-0.072	0.672	-0.107	0.9157
X ₁ X ₄	0.016	0.672	0.024	0.9810
X ₂ X ₃	0.038	0.672	0.057	0.9553
X ₂ X ₄	-0.049	0.672	-0.073	0.9425
X ₃ X ₄	0.059	0.672	0.087	0.9314

*: Significant (p<0.05).

and time (67.5 min.) were performed in Figure 4C. Max. While the adsorption Q value was obtained at 40 degrees, the amount of adsorbed strontium increased proportionally as the concentration increased (mg/g). According to the graph, the Q value was 29 mg/g. However, decreases were observed at higher temperatures. When the initial strontium concentration and adsorption time were evaluated together (Figure 4D), an increase in the amount of adsorption was detected for both parameters. The adsorption value was 31.8 mg/g at 95 mg/L strontium concentration (pH 5.5, temperature 40 °C). A peak occurred when pH and temperature were analyzed together at constant time (67.5 min) and initial strontium concentration (60 mg/g). observed to be max. strontium adsorption was 13.8 mg/g at 40 degrees and pH 5.8 (Figure 4E). When the temperature and time

were evaluated together for strontium adsorption (pH 5.5, concentration 60 mg/g), it was understood that the increase in temperature and time had a positive effect on adsorption (Figure 4F). According to the chart, the max. Q value of 15 mg/g was observed at 95 minutes.

3.3. Confirmation Rexpirments

As comparative experiments of the RSM model, adsorption was determined as follows: pH 6.6, initial strontium concentration 72 mg/L, temperature 58.8 °C, and time 95 minutes. The theoretically adsorbed Sr²⁺ amount at these optimum values was calculated as 31.978 mg/g. In addition, this result was confirmed by experiments carried out under optimum conditions and the removal was found to be 28.32 mg/g. Essentially, HDTMA-Kula shows better adsorption

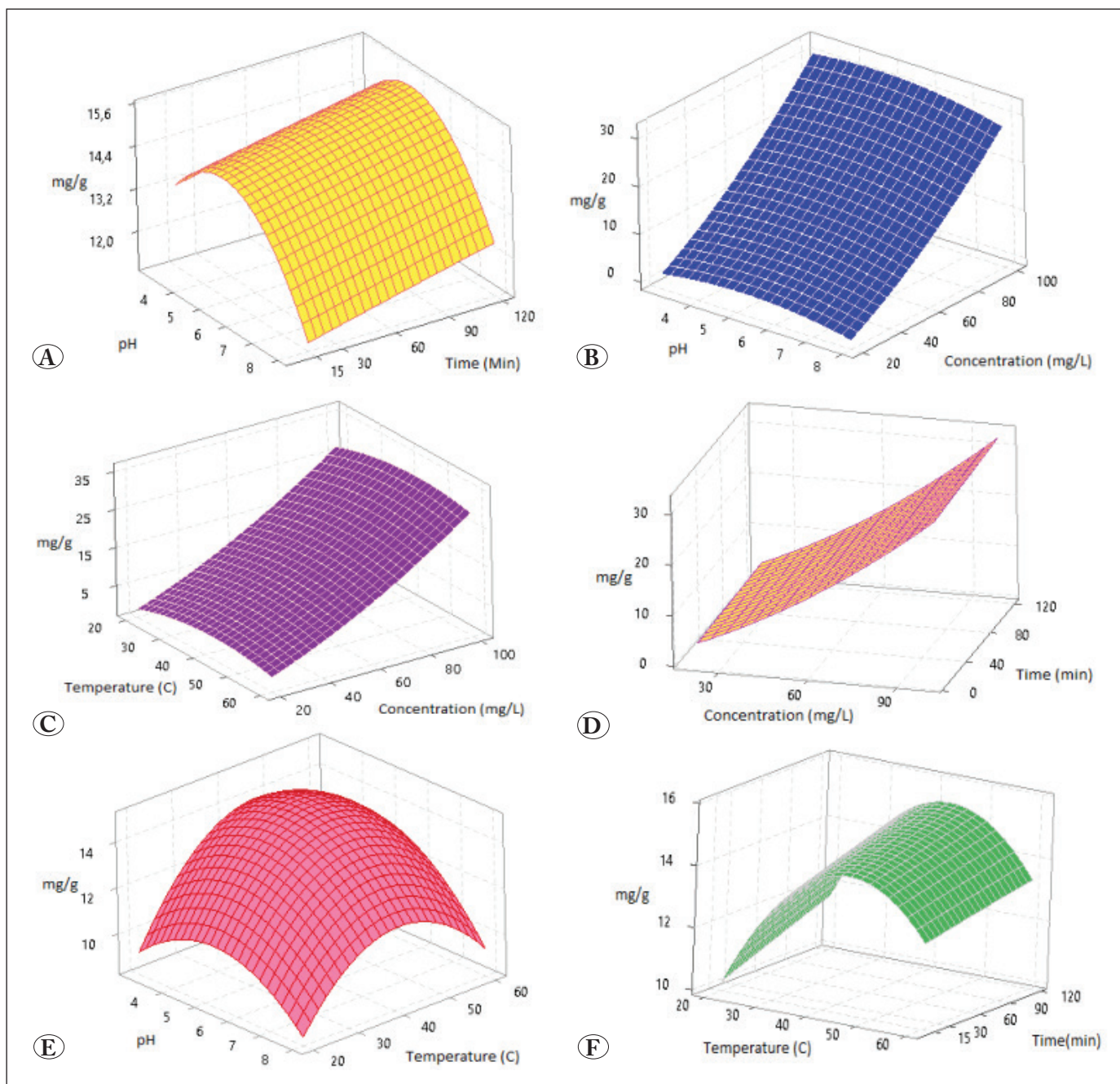


Figure 4. A-F) Response surface graphs for interactions of investigated parameters of Sr²⁺ adsorption onto HDTMA- organovolcanics.

performance for Sr²⁺ than the comparison listed in Table 5. In addition, the adsorption mechanism for Sr²⁺ is shown in Scheme 1.

3.4. Adsorption Isotherms

In this study, different isotherms were evaluated for the amount of sorbent and the concentration of adsorbate in the absorption in the interface medium. Different initial metal concentrations (20-100 mg/L) were used to evaluate the feasibility of adsorption processes.

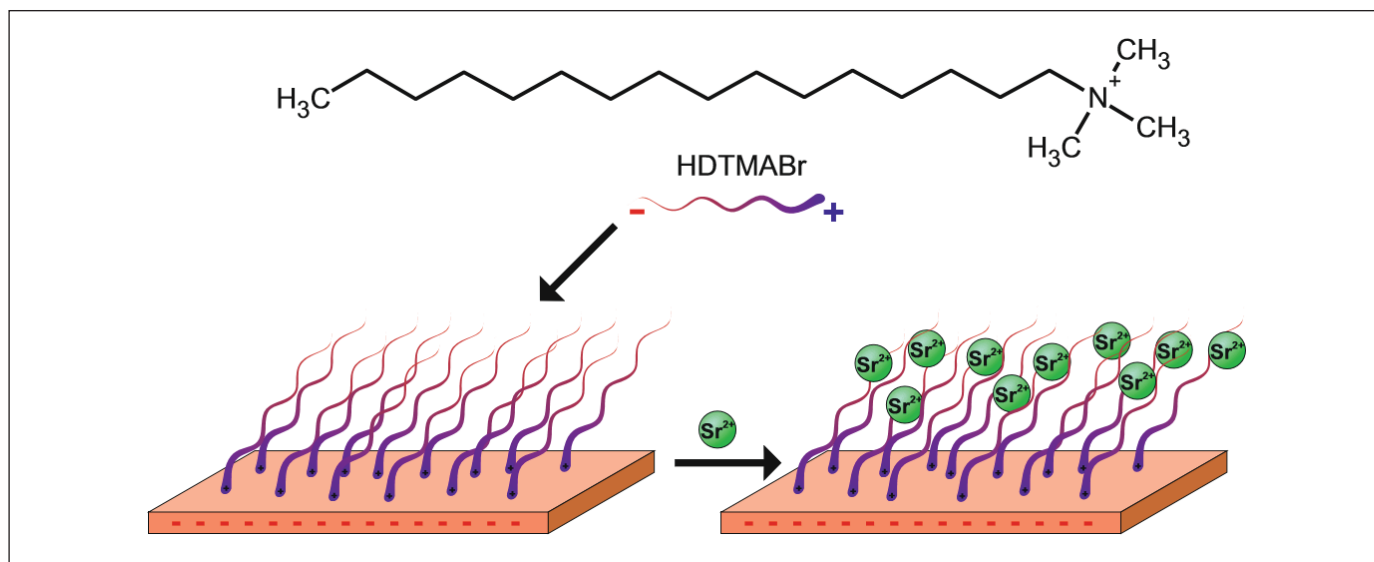
In our study, modeling of adsorption isotherms (Freundlich, Langmuir, Temkin, and DRK) was used to analyze the data. According to Langmuir equation;

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0 b_L} + \frac{C_e}{Q_0} \quad (6)$$

The value of b_L here is an adsorption equilibrium constant (L/mg) and Q_0 gives the adsorption capacity of the saturated monolayer (mg/g). The graph of C_e/q_e vs. C_e gives

Table 5. Comparison between the adsorption capacity (q_m , mg/g) of metals ions on various adsorbents.

Adsorbent	Metal Ions	Max. Ads. Capacity(mg/g)	References
HDTMA- Bentonide	U(VI)	17.39	Houhounea et al. 2016
HDTMA- Zeolite	Cr(VI)	39.47	Rosales-Landeros et al. 2013
Alginate microsphere	Sr(II)	17.8	Hong et al. 2016
Na- Montmorillonite	Sr(II)	10	Dos-Anjos et al. 2014
Natural clinoptilolite	Sr(II)	6.69	Smičiklas et al. 2007
Phosphorylated chitosan complex with cobalt (AP-CS-Co complex)	Sr(II)	3.4	Maranescu et al. 2017
HDTMA organo-montmorillonites	Sr(II)	3.91	Wu et al. 2012
Kula Volcanics		2.1	Current Study
HDTMA-Kula colcanics	Sr(II)	28.32	Current Study



Scheme 1. The mechanism of adsorption for Sr^{2+} onto surface of HDTMA- organovolcanics.

a straight line with a slope of $1/Q_0$ and intersects with $1/Q_0 B_L$.

The following Freundlich equivalence depends on adsorption on a heterogeneous surface. According to the equation:

$$q_e = k_f C_e^{1/n} \quad (7)$$

Eq.(7) can be converted into another linear form:

$$\log q_e = \log k_f + 1/n \log C_e \quad (8)$$

Here, k_f is the sorption capacity constant; $1/n$ is Freundlich's adsorption intensity constant.

The equation of the Temkin isotherm in the study is as follows:

$$q_e = B \ln A_T + B \ln C_e \quad (9)$$

where B: heat of adsorption constant (J/mol) and A_T : equilibrium binding coefficient (L/g).

Dubinin-Radushkevich isotherm generally refers to the adsorption mechanism on a heterogeneous surface with Gaussian energy distribution.

$$\ln q_e = \ln(q_s) - (K_{ad} \epsilon^2) \quad (10)$$

Where q_e : amount of adsorbate in the adsorbent at equilibrium (mg/g); q_s : theoretical isotherm saturation capacity (mg/g); K_{ad} : Dubinin-Radushkevich isotherm constant ($\text{mol}^2 / \text{kJ}^2$) and ϵ : Dubinin-Radushkevich isotherm-

constant. The approach is generally applied to distinguish the physical and chemical adsorption of metal ions by their average free energies. The E per adsorbate molecule (for removing a molecule from its position in the sorption cavity forever) can be calculated by the relationship (11):

$$E = \left[\frac{1}{\sqrt{2B_{DR}}} \right] \quad (11)$$

Where BDR is denoted as the isotherm constant. Meanwhile, the e parameter can be calculated by Eq. (12) :

$$\varepsilon = RT \ln \left[1 + \frac{1}{C_e} \right] \quad (12)$$

Here, R, T, and C_e represent gas constant (8.314 J/mol K), absolute temperature (K), and adsorbate equilibrium concentration (mg/L), respectively.

Freundlich, Langmuir, Temkin and DRK constants are shown, calculated according to R was Equation (6-12) and given in Table 6.

For Sr²⁺ sorption on HDTMA-Organovolcanic, Langmuir isotherm parameters congruences (Table 6) gave isotherms that were in good agreement with the detected behavior (R² ≥ 0.99 for Sr²⁺) (Figure 5). According to Langmuir, the maximum adsorption capacity for Sr²⁺ was 131.58 mg/g.

Table 6. Equilibrium isotherm parameters of sorption of Sr²⁺ by HDTMA-Organovolcanics.

Langmuir Isotherm				Freundlich Isotherm			
Q _m (mg/g)	K _L (Lm/g)	R ²		K _f (mg/g)	1/n	n	R ²
131.58	0.30	0.9920		4.72	0.41	2.43	0.8665
Temkin Isotherm				DRK Isotherm			
AT (L/mg)	b _T	B	R ²	q _s	K _{ad}	E	R ²
3.51	91.83	26.98	0.9655	104.03	-0.0005	31.62	0.9710

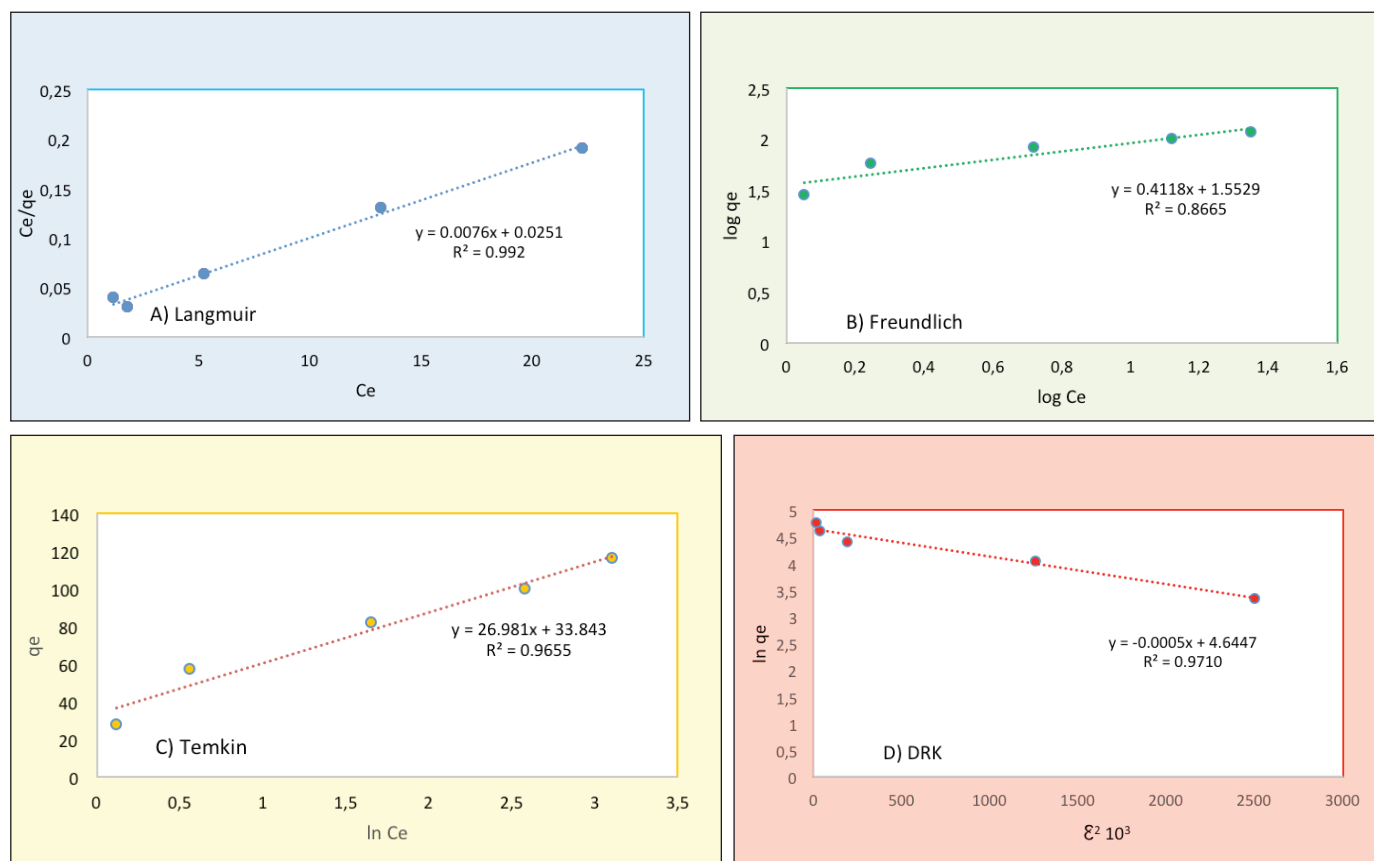


Figure 5. The adsorption isotherms for Sr²⁺ onto HDTMA- organovolcanics.

K_f and n values for Sr^{2+} were found to be 4.72 mg/g and 2.43, respectively. The Freundlich adsorption coefficient, K_p , was increased with temperature, so the sorption process was endothermic. $1/n$, ranging from 0 to 1, was a measure of sorption density or surface heterogeneity [33-34] Also, from the linear plot of the D-R model, q_s was determined as 104.3 mg/g, the mean free energy, E , is 31.62 KJ/g, indicating the chemical process. moles and R^2 was 0.9710 higher than Freundlich's. It is recommended that HDTMA-Organic-volcanic be used effectively for Sr^{2+} adsorption in aqueous media.

3.5. Thermodynamic Studies

The sorption capacity of organo-volcanics spontaneously has raised with the temperature from 293 to 313 K.

The entropy (ΔS°) and enthalpy (ΔH°) were determined according to the Van't Hoff formula:

$$\ln K_d = (\Delta S^\circ / R) - (\Delta H^\circ / RT) \quad (13)$$

Wherein, $\ln K_d$: coefficient distribution; T: temperature and R: gas constant.

The Gibbs free energy (ΔG°) were found by the formula:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (14)$$

Adsorption experiments were carried out at various temperatures (293, 303, 313 K). When the thermodynamic parameters were examined, the adsorption ΔH , ΔG and ΔS for strontium adsorption to HDTMA-Kula were calculated as 7.6 kJ/mol, -19.05 kJ/mol and 0.08 kJ/Kmol, respectively. A positive value of ΔG indicates that the adsorption is endothermic. The fact that ΔG has smaller values with increasing temperature under optimum conditions indicates that the adsorption process proceeds spontaneously at high temperatures. All these data show that Sr^{2+} adsorption on HDTMA-Kula is physical adsorption (Shakur et al. 2016-b).

4. Conclusions

In this research, Sr^{2+} adsorption from aqueous solution was performed on HDTMA-Kula organo-volcanite. All experiments were optimized with RSM. Regression analyzes show that all parameters in the study are important for Sr^{2+} adsorption. The agreement between the theoretical adsorption capacity values calculated in RSM and the actual values (0.96 for R^2) is quite high. also, the F values according to ANOVA (4.7E-06 for Sr^{2+}) show us that the study is statistically significant. The effects of process variables on

adsorption were investigated with reaction surface plots and significant effects of pH value, Sr^{2+} concentration, temperature and time on sorption were observed. Sr^{2+} adsorption capacity in HDTMA-Kula was obtained at 28.32 mg/g. Adsorption models (Langmuir, Freundlich, Temkin, and DRK) were used for the mathematical explanation of Sr^{2+} sorption on HDTMA-Kula. For Sr^{2+} sorption onto HDTMA-Kula, correlation coefficients (R^2 :0.9920) indicate that E is 31.62 KJ/mol, indicating a chemical process, and R^2 is 0.9710 higher than that of Freundlich. Thermodynamic parameters (ΔH° , ΔS° and ΔG°) were calculated and these parameters indicate that the adsorption is endothermic.

As a result, it has been understood that the natural adsorbent modified by the organic cation can be used as a good Sr^{2+} remover. Recently, there has been intense work on the use of economical adsorbents and increasing the adsorption capacity of activated adsorbents modified with different materials. The Kula volcanics, an indigenous resource, are readily available and in large quantities. A method in which the adsorption capacity of volcanics is increased by modifying them with ecologically harmless organic cations and these adsorbents are used to remove metal ion wastes, which are normally made at great cost, can provide many advantages. This method will benefit the country's economy and will prevent the problems and risks caused by such wastes.

5. References

- Aghadavoud, A., Rezaee Ebrahim Saraeae, KH., Shakur, HR., Sayyari, R. 2016. Removal of uranium ions from synthetic wastewater using ZnO/Na-clinoptilolite nanocomposites. *Radiochim Acta.*, 104: 809-819, DOI: 10.1515/ract-2016-2586
- Aralkumar, M., Sathishkumar, P., Palvannan, T. 2011. Optimization of Orange G dye adsorption by activated carbon of Thespesia populnea pods using response surface methodology. *J. Hazard. Mater.*, 186: 827-834, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.11.067
- Bezerra, MA., Santelli, RE, Oliveria, EP., Villar, LS., Escalreira, LA. 2008. Response Surface Methodology (RSM) as a Tool for Optimization in Analytical Chemistry. *Talanta*, 76: 965-977, DOI: 10.1016/j.talanta.2008.05.019
- Boparai, HK., Joseph, M., O'Carroll, DM. 2011. Kinetics and thermodynamics of cadmium ion removal by adsorption onto nano zerovalent iron particles. *J. Hazard. Mater.*, 186: 458-465, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.11.029
- Cao, J., Wu, Y., Jin, Y., Yilhan, P., Huang, W. 2014. Response surface methodology approach for optimization of the removal of chromium (VI) by NH2-MCM-41. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 45: 860-868. DOI: 10.1016/j.jtice.2013.09.011



- Cojocar, C., Zakrzewska-Trznadel, G. 2007.** Response surface modeling and optimization of copper removal from aqua solutions using polymer assisted ultrafiltration. *J. Membr. Sci.*, 298: 56-70. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.04.001
- Dos-Anjos, VE., Rohwedder, JR., Cadore, S., Abate, G., Grassi, MT. 2014.** Montmorillonite and vermiculite as solid phases for the preconcentration of trace elements in natural waters: Adsorption and desorption studies of As, Ba, Cu, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Sr, V, and Zn. *Appl. Clay. Sci.*, 99: 289-296, DOI: 10.1016/j.clay.2014.07.013
- Fisher, RV. 1961.** Proposed Classification of Volcaniclastic Sediments and Rocks. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 72: 1409-1414, DOI: 10.1130/0016-7606(1961)72[1409:PCOVSA]2.0.CO;2
- Grahek, Z., Maćefat, MR. 2005.** Determination of radioactive strontium in seawater. *Analy. Chim. Acta.*, 534(2): 271-279, DOI: 10.1016/j.aca.2004.11.050
- Haghsresht, F., Lu, GQ. 1998.** Adsorption characteristics of phenolic compounds onto coal-reject-derived adsorbents. *Energy and Fuels.*, 12:1100-1107, DOI: 10.1021/ef9801165
- Hong, HJ., Ryu, J., Park, IS., Ryu, T., Chung, KS., Kim, BG. 2016.** Investigation of the strontium (Sr(II)) adsorption of an alginate microsphere as a low-cost adsorbent for removal and recovery from seawater. *J. Environ. Manage.*, 165: 263-270, DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.040
- Houhounea, F., Niboub, D., Chegrouchea, S., Menacera, S. 2016.** Behaviour of modified hexadecyltrimethylammonium bromide bentonite toward uranium species. *J. Environ. Chem. Eng.*, 4: 3459-3467, DOI: 10.1016/j.jece.2016.07.018
- Kaynar, UH., Sabikoglu, I., Kaynar, SC., Eral, M. 2015** Removal of thorium (IV) ions from aqueous solution by a novel nanoporous ZnO: Isotherms, kinetic and thermodynamic studies. *J. Environ. Radioact.*, 150: 145-151, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.08.014
- Kunwar, PS., Shikha, G., Arun, KS., Sarita, S. 2011.** Optimizing adsorption of crystal violet dye from water by magnetic nanocomposite using response surface modeling approach. *J. Hazard. Mater.*, 186: 1462-1473, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.12.032
- Landstetter, C., Wallner, G. 2006.** Determination of strontium-90 in deer bones by liquid scintillation spectrometry after separation on Sr-specific ion exchange columns. *J. Environ. Radioact.*, 87: 315-324, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2005.12.008
- Lee, JJ., Choi, J., Park, JW. 2002.** Simultaneous sorption of lead and chlorobenzene by organobentonite. *Chemosphere*, 49: 1309-1315, DOI: 10.1016/S0045-6535(02)00531-3
- Liu, S., Li, S., Zhang, H., Wu, L., Sun, L., Ma, J. 2016.** Removal of uranium(VI) from aqueous solution using graphene oxide and its amine-functionalized composite. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 309: 607-614, DOI:10.1007/s10967-015-4654-8
- Majdan, M., Pikus, S., Gajowiak, A., Gładysz-Płaska, A., Krzyżanowska, H., Żuk, J., Bujacka, M. 2010.** Characterization of uranium(VI) sorption by organobentonite. *App. Surf. Sci.*, 256-(17): 5416-5421, DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.12.123
- Maranescu, B., Popa, P., Lupa, L., Maranescu, V., Visa, A. 2017.** Use of chitosan complex with aminophosphonic groups and cobalt for the removal of Sr²⁺ ions. *Sep. Sci. Technol.*, DOI: 10.1080/01496395.2017.1304961
- Myers, RH., Montgomery, DC. 2011.** Response surface methodology. 2nd ed. Wiley; New York.
- Prakash, O., Talat, M., Hasan, SH., Pandey, RK. 2008.** Factorial design for the optimization of enzymatic detection of cadmium in aqueous solution using immobilized urease from vegetable waste. *Bioresour. Technol.*, 99: 7565-7572, DOI: 10.1016/j.biortech.2008.02.008
- Richards, S., Bouazza, A. 2010.** Phenol adsorption in organo-modified basaltic clay and bentonite. *App. Clay Sci.*, 37: 133-142, DOI: 10.1016/j.clay.2006.11.006
- Rosales-Landeros, C., Barrera-Díaz, CE., Bilyeu, B., Guerrero, VV., Núñez, FU. 2013.** A review on Cr (VI) adsorption using inorganic materials. *Am. J. Anal. Chem.*, 4: 8-16, DOI: 10.4236/ajac.2013.47A002
- Ryu, CH., Yeo, SD. 2010.** Vapor phase adsorption of trichloroethane using organically modified montmorillonite. *J. Ind. Eng. Chem.*, 377: 441-449, DOI: 10.1016/j.jiec.2010.01.043
- Saitoh, T., Shibayama, T. 2016.** Removal and degradation of β -lactam antibiotics in water using didodecyldimethylammonium bromide-modified montmorillonite organoclay. *J. Hazard. Mater.*, 317: 677-685, DOI:10.1016/j.jhazmat.2016.06.003
- Shakur, H.R.; Rezaee Ebrahim Saraceea, Kh.; Abdib, M.R.; Azimic, G. (2016-a)** Selective removal of uranium ions from contaminated waters using modified-X nanozeolite. *Appl. Radia. Iso.* 118: 43-55. doi:10.1016/j.apradiso.2016.08.022
- Shakur, HR., Rezaee Ebrahim Saraceea, KH., Abdi, MR., Azimic, G. 2016-b.** A novel PAN/NaX/ZnO nanocomposite absorbent: synthesis, characterization, removal of uranium anionic species from contaminated water. *J. Mater. Sci.*, 51: 9991-10004, DOI: 10.1007/s10853-016-0227-7
- Shakur, HR., Rezaee Ebrahim Saraceea, KH., Abdib, M.R., Azimic, G. 2016-c.** Highly selective and effective removal of uranium from contaminated drinking water using a novel PAN/AgX/ZnO nanocomposite. *Micr. Mes. Mater.*, 234 (2016) 257-266, DOI: 10.1016/j.micromeso.2016.07.034
- Sharma, S., Malik, A., Satya, S. 2009.** Application of response surface methodology (RSM) for optimization of nutrient supplementation for Cr (VI) removal by *Aspergillus lentulus* AML05. *J. Hazard. Mater.*, 164: 1198-1204., DOI:10.1016/j.jhazmat.2008.09.030

- Smičiklas, I., Dimović, S., Plečaš, P. 2007.** Removal of Cs⁺, Sr²⁺ and Co²⁺ from aqueous solutions by adsorption on natural clinoptilolite. *Appl. Clay Sci.*, 35: 139-144, DOI: 10.1016/j.clay.2006.08.004
- Sprynsky, M., Kowalkowska, T., Tutu, H., Cukrowskab, EM., Buszewski, B. 2015.** The separation of uranium ions by natural and modified diatomite from aqueous solution. *Colloid Surface A.*, 465: 159-167, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2014.10.042
- Sprynsky, M., Kovalchuk, I., Buszewski, B. 2010.** The separation of uranium ions by natural and modified diatomite from aqueous solution. *J. Hazard. Mater.*, 181: 700-707, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.069
- Uddin, MK. 2017.** A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chem. Eng. J.*, 308: 438-462, DOI: 10.1016/j.cej.2016.09.029
- Xi, Y., Frost, R., He, H. 2007.** Modification of the surfaces of Wyoming montmorillonite by the cationic surfactants alkyl trimethyl, dialkyl dimethyl, and trialkyl methylammonium bromides. *J. Colloid. Interface. Sci.*, 305: 150-158, DOI: 10.1016/j.jcis.2006.09.033
- Wu, P., Dai, Y., Longa, H., Zhu, N., Li, P., Danga, Z. 2012.** Characterization of organo-montmorillonites and comparison for Sr(II) removal: Equilibrium and kinetic studies. *Chem. Eng. J.*, 191: 288-296, DOI: 10.1016/j.cej.2012.03.017
- Zhang, L., Zhang, L., Wu, T., Jing, X., Li, R., Liu, J., Liu, Q. 2015.** In situ growth of ZnO nanorod arrays on cotton cloth for the removal of uranium (VI). *RSC. Adv.*, 5: 53433-53440, DOI: 10.1039/C5RA08489J



Bazı Gıda Örneklerinde Gama Spektrometresi İle Doğal ^{40}K Aktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Determination of Natural ^{40}K Activity Concentrations in Some Food Samples by Gamma Spectrometer

Sermin Çam-Kaynar* , İlayda Taner 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Manisa

Öz

Dünya var olduğundan beri her yerde radyasyon mevcuttur. Radyasyon, radyoaktif çekirdeklerin kararlı hale gelebilmek için hızlı parçacıklar ya da elektromanyetik dalga şeklinde yayınladığı fazla enerjidir. Radyasyon, iyonlaştırıcı radyasyon (kozmetik ışınlar, x-ışınları ve radyoaktif maddelerden yayınlanan radyasyon) ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon (kızılötesi, morötesi, görünür bölge, radyo dalgaları ve mikro dalgalar) olmak üzere ikiye ayrılır. Dünyanın oluşumundan beri etrafta bulunan çok uzun ömürlü radyonüklidler doğal bir radyasyon düzeyi oluşturur. Bu radyonüklidler, insan vücuduna yeme-içme, soluma ya da derideki yaralardan girerler. Vücuda giren radyasyonun sağlık etkileri arasında en çok karşılaşılan kanser yapma etkisidir. Bu çalışmada, günlük hayatta tüketilen ve literatür çalışmalarına bakıldığında ^{40}K aktivite konsantrasyonu diğer gıda ürünlerine göre yüksek olduğu düşünülen bazı gıda ürünlerinde doğal radyoaktivite konsantrasyonları NaI(Tl) sintilasyon dedektörlü gama spektrometre sistemi kullanılarak tayin edilmiş ve elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gıda, ^{40}K , NaI(Tl) dedektörü, Radyoaktivite

Abstract

Radiation has been present everywhere since the world existed. Radiation is the excess energy released by radioactive nuclei in the form of fast particles or electromagnetic waves to stabilize. Radiation is divided into ionizing radiation (cosmic rays, X-rays, and radiation emitted from radioactive materials) and non-ionizing radiation (infrared, ultraviolet, visible region, radio waves, and microwaves). The very long-lived radioactive elements that have been around since the earth's formation create a natural level of radiation. These radioactive elements enter the human body through eating and drinking, inhalation, or skin wounds. Among the health effects of radiation entering the body, it is the most common cancer-causing effect. In this study, natural radioactivity concentrations in some food products that are consumed in daily life and whose ^{40}K activity concentration is thought to be higher than other food products, were determined by using a gamma spectrometer system with NaI(Tl) scintillation detector and the results were compared with the literature.

Keywords: Food, ^{40}K , NaI(Tl) detector, Radioactivity

1. Giriş

Dünyadaki hayatın başlangıcından itibaren yaşayan her şey radyasyona maruz kalmıştır. İnsanlar radyasyonla birlikte var oldukları halde radyasyonun görülmemesi, duyulması veya hissedilememesi insanları rahatsız etmemektedir

(Henriksen vd. 2013). Herkes önemli oranda doğal radyasyona ve yapay radyasyona maruz kalmaktadır. Yıllık alınan radyasyon dozunun %81'i doğal radyasyondan %19'u ise yapay radyasyondan kaynaklanmaktadır (Işık 2018). Doğal radyasyon kaynaklarını kozmik radyasyon, karasal radyasyon ve içsel radyasyon olmak üzere 3 grupta sınıflandırabiliriz.

1.1. Kozmik Radyasyon

Kozmik ışınlar, Victor F. Hess tarafından 1912 yılında keşfedilmiştir. İyonlaşma odalarıyla yapılan bir dizi balon deneyinde iyonizasyon seviyesinde 1000 m'den itibaren fark edilir bir artış tespit edilmiş ve 5 km yüksekliğindeki iyonlaşma seviyesinin deniz seviyesinde gözlemlenen seviyelerin birkaç

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: sermin.cam@cbu.edu.tr

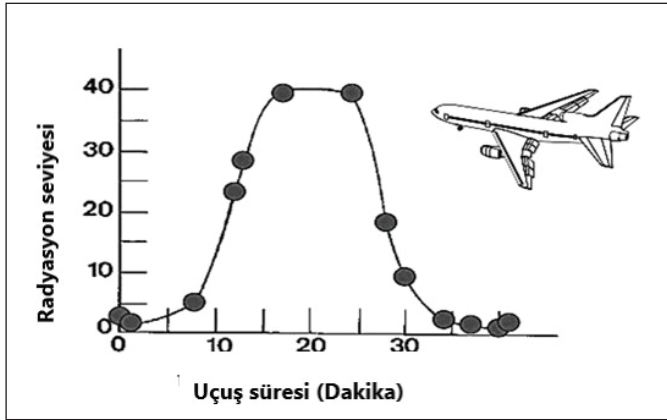
Sermin Çam-Kaynar  orcid.org/0000-0002-3022-4908

İlayda Taner  orcid.org/0000-0003-3754-9534



katı olduğu görülmüştür. Bu iyonlaşmanın atmosferden gelen radyasyona bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu radyasyona Kozmik radyasyon adı verilmektedir.

Kozmik ışınlar, esas itibarıyla, uzayda kökeni belli olmayan ve atmosfere sabit miktarda ulaşan yüksek enerjili protonlardır. Kozmik ışınlar atmosfere nüfuz ettikçe karmaşık reaksiyonlar başlatır ve kademeli bir şekilde soğurular ve böylece yükseklik azaldıkça kozmik ışınlardan gelen doz düşmektedir. Kozmik radyasyon; protonlar, alfa parçacıkları, elektronlar ve yüksek enerjili diğer çeşitli parçacıklar gibi birçok radyasyon tipinin bir karışımıdır. Yer seviyesindeki kozmik radyasyon esas olarak, müonlar, elektronlar, pozitronlar ve fotonlardan oluşur; dozun büyük bir kısmı müonlar ve elektronlardan kaynaklanır. UNSCEAR, yer seviyesindeki kozmik ışınlardan kaynaklanan yıllık etkin dozu, enlem ve yükseklikteki değişimleri dikkate alarak ortalama 0,4 mSv civarında hesaplamıştır (TAEK 2009). Şekil 1'e bakıldığında uçuşa başlamadan önce, yer düzeyinde radyasyon seviyesi 1'e eşit olarak ayarlanmış ve uçak, 8500 m yüksekliğe ulaştığında radyasyon seviyesinin yer seviyesindeki değerinden yaklaşık 40 kat fazla olduğu görülmüştür (Henriksen vd. 2013).



Şekil 1. Hava yolculuğu sırasındaki radyasyon seviyesi (Henriksen vd. 2013)

1.2. Karasal Radyasyon

Dünyanın kendisi karasal bir radyasyon kaynağıdır. Karasal radyasyonu, primordial radyonüklidler olan ^{235}U , ^{238}U ve ^{232}Th bozunum serilerindeki radyonüklidler ve ^{40}K gibi radyonüklid oluşturur (Santawamaitre vd. 2011).

Radyoaktif bir element olan Uranyum (U), 1789 yılında keşfedilmiştir (Eroğlu ve Şahiner 2017). Uranyum, aktinit serisinin bir üyesi olan metalik, gümüş grisi bir elementtir. Uranyumun atom numarası 92'dir (Açıkgöz 2018), ka-

yalarda ve toprakta birkaç ppm'lik (milyonda bir) düşük konsantrasyonlarda bulunmaktadır (TAEK 2009). Doğada serbest olarak bulunmayan uranyum, yerkabuğunda birçok elementle birleşerek yüzlerce mineral oluşturur (Açıkgöz 2018). Uranyumun doğal olarak ^{238}U , ^{235}U ve ^{234}U olmak üzere üç izotopu vardır (Url-1 2021). ^{238}U izotopu, doğal uranyumun %99.28'ini oluşturur (Açıkgöz 2018). Uzun bir radyonüklid serisinin ana radyonüklidi olan ^{238}U , ardışık bozunmalar yaparak kararlı bir çekirdek olan ^{206}Pb ile ulaşır. Bu bozunum serisindeki bozunma ürünlerinden biri, ^{222}Rn olarak adlandırılan, atmosfere ulaşarak bozunmaya devam eden radyoaktif gaz radonun bir izotopudur (TAEK 2009).

Radyoaktif bir element olan Toryum ilk kez 1828 yılında keşfedilmiştir. (Eroğlu ve Şahiner 2017). Toryum, atom numarası 90 olan, gümüş beyazı renginde doğal radyoaktif bir elementtir. Doğada tek başına bulunmaz, minerallerin yapısında bulunur (Açıkgöz 2018). Toryum, uranyuma göre doğada üç kat daha fazla bulunur. Dört adet doğal toryum izotopu vardır. Bunlardan en yaygın olanı ^{232}Th 'dir (Açıkgöz 2018). ^{232}Th , başka bir radyoaktif serinin ana başlangıç elementidir. Toryum serisinin bozunum ürünlerinden biri radonun diğer bir izotopu olan, toron olarak adlandırılan ^{220}Rn radyoaktif gazıdır (TAEK 2009).

Potasyum, uranyum veya toryumdan daha yaygındır ve yer kabuğunun ağırlık olarak % 2,4'ünü oluşturur (TAEK 2009). Potasyum yumuşak, gümüş-beyaz bir metaldir. Doğal olarak evrenin oluşumundan beri tüm topraklarda, kayalarda ve tüm bitki ve hayvan dokularında bulunmaktadır. Potasyumun, ^{39}K , ^{40}K ve ^{41}K olmak üzere üç izotopu vardır. ^{39}K ve ^{41}K kararlı yani radyoaktif olmayan izotoplarıdır. Doğal olarak oluşan potasyumun % 93.26'ünü ^{39}K , % 6.73'ü ^{41}K izotopu ve geri kalan % 0.012'sini ^{40}K izotopu oluşturur. ^{40}K , potasyumun doğal olarak oluşan radyoaktif bir izotopudur (Url-2 2021).

Radyoaktif bir izotop olan ^{40}K , $1,248 \times 10^9$ yıllık uzun bir yarı ömre sahiptir ve 3 farklı beta ışınımı yayabilir. Öncelikle %89.2 olasılıkla beta parçacığı yayınlayarak (maksimum enerjisi 1,35 MeV) ^{40}Ca 'a bozunur. %10.72 olasılıkla bir gama ışınması (maksimum enerjisi 1.46 MeV) yaparak ^{40}Ar 'a bozunur. Üçüncü olarak çok düşük bir ihtimalle %0,001 olasılıkla pozitron ışınması yaparak ^{40}Ar 'a bozunur. İnsan ve hayvanlarda doğal aktiviteyi oluşturan en önemli kaynaklardan biri potasyumdur. Bir insan vücudundaki yaklaşık 160 g potasyum bulunurken bunun sadece 0.019 g radyoaktif ^{40}K izotopuna aittir. Bu da hayat boyunca sürekli olarak saniyede 4400 bozunum yaparak bozunur (Çiçek 2013).

Potasyum yer kabuğunda bulunma oranı ortalama %2.4'dir ve dünyanın kabuğunda en çok bulunan yedinci (Url-3, 2023) ve okyanuslardaki çözeltilerde en çok bulunan altıncı elementtir. Mineral suyunda ve okyanus suyunda feldispat, karnalit, güherçile, silvit ve yeşil kumda bulunur. Potasyum toprağın önemli bir bileşeni olup bitki gelişimi ve insan beslenmesinde temel besin maddesidir (Url-2 2021). Doğal radyoaktif olan ^{40}K ve ^{14}C elementleri de bir çok yiyecek vücuda alınmaktadır. Bir çok besinde yüksek miktarda bulunan radyonüklidlerin insan vücudundaki düzeyleri yaşanan bölge ve beslenme alışkanlığına bağlı olarak da değişiklik göstermektedir. (Hacıosmanoğlu 2017).

1.3. İçsel Radyasyon

Kozmik ve karasal radyasyona ek olarak, bütün insanlarda doğuştan itibaren radyonüklidler ve bunların bozunum ürünleri mevcuttur. Bunların başında ^{40}K , ^{210}Pb ve ^{14}C gelmektedir. Karasal ve kozmik radyasyonlardan alınan dozlar, içsel radyasyondan alınan dozlara göre büyüktür. İçsel radyasyon, doğal radyasyon kaynaklarının %11'lik kısmını oluşturmaktadır (Işık 2018). Yenilen yemekler ve nefes alınan hava, radyoaktif izotopları (^{238}U ve ^{232}Th serilerinden gelen radyonüklidleri) içermektedir (Henriksen vd. 2013). Bunlar vücuda alındığında iç ışınlanmaya neden olmaktadır. Bu iç ışınlanma kaynaklarının sebep olduğu yıllık ortalama etkin dozun 0,3 mSv olduğu ve bunun yarısının da ^{40}K 'tan kaynaklandığı tahmin edilmektedir (TAEK 2009). Potasyumun günlük tüketimi yaklaşık 2.5 g'dır ve bu potasyum miktarı vücuda ^{40}K 'dan gelen yaklaşık 75 Bq'lık aktivite sağlamaktadır. Yumuşak dokuyu oluşturan tüm hücrelerde potasyum bulunmaktadır (Henriksen vd. 2013). Vücuttaki potasyum ve dolayısıyla ^{40}K miktarı kas miktarı ile değişir; genç erkeklerde yaşlı bayanlara oranla yaklaşık iki kat daha fazladır (TAEK 2009). Vücut ağırlığı başına potasyum içeriği cinsiyete ve yaşa göre değişmektedir. ^{40}K 'dan kaynaklanan doz da benzer şekilde kişiden kişiye değişiklik göstermektedir (Henriksen vd. 2013).

Gıdadaki potasyum içeriğinin sabit bir kısmı olan ^{40}K izotopundan gelen doğal radyoaktivite, gıdadan gıdaya potasyum konsantrasyonuna göre önemli ölçüde değişiklik gösterir. Genellikle gıdalarda potasyum konsantrasyonu 1000 ile 6000 ppm aralığıdır. İnsan vücudundaki ortalama potasyum konsantrasyonu yaklaşık 2000 ppm'dir (IAEA 2002). İnsanların biyolojik işlemlerini sürdürmek için potasyuma ihtiyacı vardır. ^{40}K , içme suyu, yemek veya soluduğumuz hava ile vücuda alındıktan sonra kan dolaşımına girmekte veya nefes alma ile hızla tüm organ ve dokulara dağılmaktadır. ^{40}K , 30 günlük biyolojik yarı ömürle vücuttan atılır (Url-2, 2021). Günlük potasyum alımlarının yaklaşık %90'ı idrarla

%10'u ise dışkı ile atılır (IAEA 2002). Vücudun potasyum içeriği katı bir homeostatik kontrol altındadır ve çevresel seviyelerdeki değişikliklerden etkilenmemektedir. Bu nedenle vücuttaki ^{40}K içeriği sabittir ve yetişkin bir erkek yaklaşık 0.1 μCi 'ye sahiptir. Her yıl bu izotop, vücutta yumuşak dokulara yaklaşık 18 mrem ve kemiklere 14 mrem dozlar göndermektedir (Url-2, 2021).

Radyasyonun keşfinden bu yana radyasyon araştırmaları, radyasyonun sağlığı etkileyebileceği biyolojik mekanizmalar hakkında kapsamlı bilgiler sağlamıştır. Radyasyonun hücre seviyesinde etki yaratarak genellikle kromozomdaki iplikçiklerden deoksiribonükleik aside (DNA) doğrudan zarar vermesinden dolayı hücre ölümlerine veya modifikasyonlarına neden olduğu bilinmektedir. Hasar görmüş veya ölen hücre sayısı yeterince büyükse organ yetmezliği ve hatta ölüme neden olabilir. Ayrıca DNA'da hücreyi öldürmeyen başka hasarlar da oluşabilir. Bu tür hasarlar genellikle tamamen onarılır ya da hücre mutasyonu olarak bilinen değişiklikler, sonraki hücre bölünmelerine yansıtılır ve sonuçta kansere yol açabilmektedir (Lean vd. 2016). Bu amaçla tüketilen gıda ürünlerinde doğal radyasyondan gelen radyonüklidlerin konsantrasyonlarının belirlenmesi sağlık açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada bazı gıda ürünlerinde doğal radyonüklid (^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th) konsantrasyonlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Gereç ve Yöntem

Bu çalışmada günlük yaşantıda çok tüketildiği düşünülen ve literatür çalışmalarında yer alan yedi gıda maddesi seçilmiştir. Seçilen gıda maddeleri buğday, kırmızı mercimek, kuru fasulye, mısır, muz, pirinç ve yeşil mercimektir. Gıda örneklerinde muz hariç diğerleri kuru ve taneli formdadır. Muz gıda maddesinin yüksek ^{40}K aktivite konsantrasyonuna sahip olduğu düşünüldüğü için seçilmiştir. Gıda maddeleri İzmir'deki marketlerden ve her örnekten yaklaşık 500 g olacak şekilde alınmıştır. Gıda maddelerindeki ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarını ölçmek için örnekler iki farklı formda (toz halinde ve kül halinde) hazırlanmıştır.

2.1. Örneklerin Toz Haline Getirilmesi

Altı gıda örneği (buğday, kırmızı mercimek, kuru fasulye, mısır, pirinç ve yeşil mercimek) 60°C sıcaklıktaki etüve koyularak örneklerdeki nemin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulan gıda örnekleri öğütülüp her bir örnekten 100 g tartılarak yüksekliği 6.5 cm, eni 4.5 cm genişliği 3.5 cm olan plastik kutulara yerleştirilmiş, kaplar sıkı bir şekilde kapatılmış ve radyoaktif dengeye ulaştırılması için 30 gün bekletilmiştir (Altıkulaç 2021).

2.2. Örneklerin Kül Haline Getirilmesi

Gıda örnekleri (buğday, kırmızı mercimek, kuru fasulye, mısır, muz, pirinç ve yeşil mercimek) içlerindeki organik maddeleri uzaklaştırmak için 350 °C de kül haline getirilmiştir (Syarbaini vd. 2014). Kül formuna gelen örnekler öğütücü ile öğütülüp, tartılarak yüksekliği 6.5 cm, eni 4.5 cm genişliği 3.5 cm olan plastik kaplara yerleştirilmiş ve kaplar hava geçirmeyecek şekilde sıkıca kapatılıp 30 gün bekletilerek radyoaktif denge oluşması sağlanmıştır.

Hazırlanan örnekler $3'' \times 3''$ NaI(Tl) sintilasyon dedektörlü gama spektrometre sistemi kullanılarak ölçülmüştür. Gama spektrometre sistemi NaI(Tl) sintilasyon dedektörü, fotoçoğaltıcı tüp, tüp ayağı ve preamplifikatör, Ortec model 478 Volt yüksek voltaj kaynağı ve Ortec Maestro bilgisayar programlı puls yüksekliği analizöründen oluşmaktadır. Gama spektrometresi ile elde edilen spektrumda; ^{40}K pikinin enerjisi 1.46 MeV'lik gama ışınından ileri gelmektedir. Potasyum kanalındaki sayımların çoğu art ortam sayımlarından kaynaklanmaktadır. Sistemin bulunduğu ortamdan bu kanala gelen katkılar %65 dolayındadır. Toryum ve uranyum sayımlarından potasyum pikine gelen katkı %15-20 arasındadır. Bu yüzden potasyum kanalındaki sayımlar doğrudan konsantrasyon hesabında kullanılmaz. Gama spektrumunda uranyum piki için seçilen kanallara toryumdan ihmal edilemeyecek katkılar gelmektedir. Toryum serisindeki ^{208}Tl 'den yayınlanan 2.614 MeV enerjili gamadan kaynaklanan tek kaçak piki (2.10 MeV) ve çift kaçak piki (1.59 MeV) oluşur. Uranyum kanalını belirlemede kullanılan 1.76 MeV'lik gama enerjili pik, bu iki enerji (2.10 MeV'deki tek kaçak pik ve 1.59 MeV'deki çift kaçak pik) arasında kalmaktadır. Toryum için belirlenen kanallardaki sayımların %86'sı toryumdan, %2'si uranyumdan ve geri kalanda art ortamdan gelmektedir (Çam, 2011). Her bir örnek için 2 saatlik sayım yapılarak oluşan spektrumdan ilgili pik alanı altındaki sayım değerleri alınmıştır. Çizelge 1'de verilen formüller kullanılarak

her bir örnek için aktivite konsantrasyonları hesaplanmıştır.

3. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada kullanılan toz ve kül formundaki gıda örneklerinin NaI(Tl) sintilasyon dedektörlü gama spektrometresi ile ölçülen aktivite konsantrasyonlarının sonuçları Çizelge 2'de verilmektedir. Toz halindeki örneklerde ^{40}K aktivite konsantrasyonu 36.5-416.1 Bq.kg⁻¹ aralığında değişmekte olup en yüksek potasyum aktivitesinin kuru fasulyede en düşük potasyum aktivitesinin de pirinç gıda maddesinde olduğu görülmektedir. ^{238}U aktivite konsantrasyonu 2.9-12.8 Bq.kg⁻¹ aralığında tespit edilmiştir. En yüksek uranyum aktivitesi pirinç örneğinde tespit edilirken buğday örneğinde uranyum aktivitesi tespit edilememiştir. ^{232}Th aktivite konsantrasyonu buğday, kuru fasulye ve pirinç ürünlerinde dedekte edilememişken diğer örneklerde (yeşil mercimek, kırmızı mercimek, mısır) toryum aktivitesi 0.7-5.0 Bq.kg⁻¹ aralığında değişmiştir (Çizelge 2).

Kül formunda hazırlanıp yapılan ölçüm sonuçlarına bakıldığında gıda örneklerindeki ^{40}K aktivitesinin 77.1 – 2132.8 Bq.kg⁻¹ aralığında değiştiği görülmektedir. Pirinç örneğinde potasyum aktivitesi dedekte edilemezken en yüksek aktivite kuru fasulyede ölçülmüştür. Muz ve yeşil mercimekte ölçülen potasyum aktivite konsantrasyonlarının da yine yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Uranyum aktivitelerine bakıldığında 5 örnekte uranyum aktivitesinin dedekte edildiği ve 2.1- 45.3 Bq.kg⁻¹ aralığında olduğu görülmektedir. En yüksek değerler kuru fasulyede belirlendiği görülmektedir. Toryum aktivite konsantrasyonları da 4 gıda maddesinde belirlenememişken ölçülen aktiviteler 0.9 – 11.2 Bq.kg⁻¹ aralığında değişmektedir. En yüksek toryum aktivitesi pirinç örneğinde ölçülmüştür. Mısır, muz ve yeşil mercimekte toryum aktivitesi tespit edilmemiştir (Çizelge 2).

Çizelge 1. Deneysel Faktörler (Çam, 2011).

Konsantrasyon Eşitlikleri	
$e_{\text{Th}} \text{ (ppm)} = C(\text{Th})/K_1$	
$e_{\text{U}} \text{ (ppm)} = (C(\text{U}) - aC(\text{Th}))/K_2$	
$\%K \text{ (ppm)} = (C(\text{K}) - g(C(\text{U}) - aC(\text{Th})) - bC(\text{Th}))/K_3$	
Sıyırma oranları	Duyarlılık faktörleri
$a=0.67$	$K_1=17.04$
$b=0.93$	$K_2=55.99$
$g=0.87$	$K_3=586.87$
C(U), C(Th), C(K): örneklerdeki her bir U, Th ve K kanalındaki sayım değerleri.	

Çizelge 2. Toz ve kül formundaki gıda örneklerinin ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonları.

Gıda Örnekleri	^{40}K (Bq.kg ⁻¹)	^{238}U (Bq.kg ⁻¹)	^{232}Th (Bq.kg ⁻¹)
<i>Toz formunda</i>			
Buğday	143.9	MDA*	MDA
Kırmızı Mercimek	243.1	3.8	5.0
Kuru Fasulye	416.1	4.6	MDA
Mısır	91.8	2.9	1.2
Pirinç	36.5	12.8	MDA
Yeşil Mercimek	223.3	12.4	0.7
Minimum-Maksimum	36.5-416.1	2.9-12.8	0.7-5.0
<i>Kül formunda</i>			
Buğday	77.1	2.1	6.7
Kırmızı Mercimek	317.4	18.1	9.1
Kuru Fasulye	2132.8	45.3	0.9
Mısır	177.2	8.0	MDA
Muz	963.3	MDA	MDA
Pirinç	MDA	MDA	11.2
Yeşil Mercimek	549.3	2.4	MDA
Minimum-Maksimum	77.1-2132.8	2.1-45.3	0.9-11.2

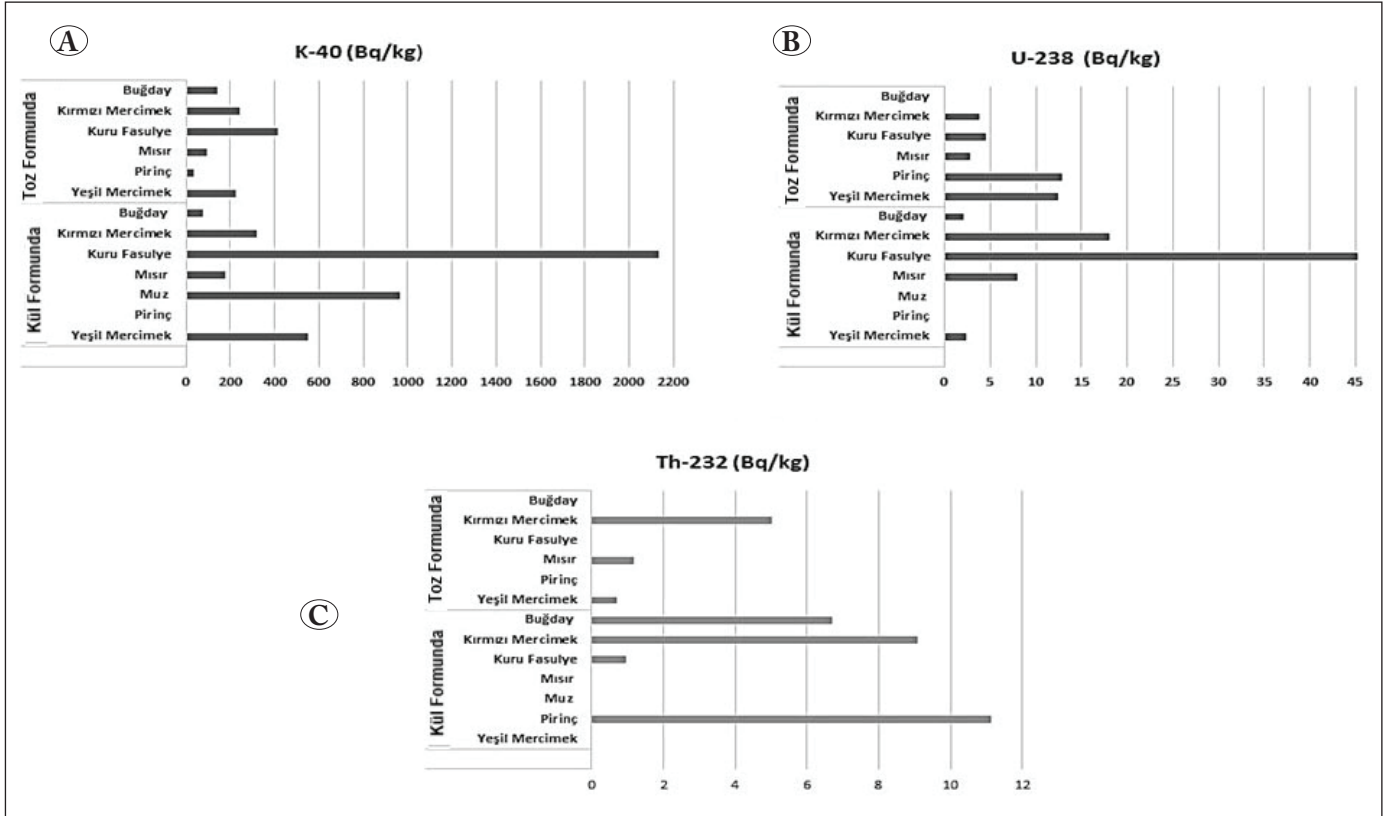
*MDA: Minimum dedekte edilebilir aktivite.

Kül ve toz halindeki gıda örneklerinin ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarının karşılaştırması Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2'ye bakıldığında en yüksek aktivite sonuçlarının kül halindeki gıda örneklerinde olduğu görülmektedir. Kül formundaki buğday örneğindeki ^{40}K aktivite konsantrasyonunun değeri (2132 Bq.kg⁻¹) Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi, (UNSCEAR -United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) tarafından verilen gıda örneğindeki dünya ortalama limit değerinin (580 Bq.kg⁻¹) yaklaşık 4 katı olduğu görülmektedir. Kül halindeki kuru fasulyede ölçülen ^{238}U aktivite konsantrasyonunun (45.3 Bq.kg⁻¹) UNSCEAR tarafından gıda ürünleri için önerilen limit değer olan 40 Bq.kg⁻¹ değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Toz ve kül haline getirilmiş gıda örneklerinde dedekte edilen ^{232}Th aktivite konsantrasyonları sonuçlarının da UNSCEAR tarafından limit değer olarak verilen 40 Bq.kg⁻¹ değerinden daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 3'de toz formundaki gıda örneklerinin sonuçları literatürle karşılaştırıldığında bu çalışmada buğday gıda maddesinde tespit edilen ^{40}K aktivite konsantrasyonunun sonuçları Kuzey Hindistan hariç diğer İran, Nijerya ve Türkiye-Muğla'da yapılan çalışmalarda sonuçlardan daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca literatür çalışmalarında buğday

örneğinde ^{238}U ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonu tespit edilirken bu çalışmada ^{238}U ve ^{232}Th aktivitesi tespit edilememiştir. Kuru fasulye örneğindeki sonuçlara bakıldığında bu çalışmadaki ^{40}K aktivite konsantrasyonunun literatür çalışmalarındaki sonuçlardan düşük olduğu görülmektedir. Kuru fasulyede bu çalışmada ölçülen ^{238}U aktivite konsantrasyonu Vietnam'da yapılan çalışma dışında diğer çalışmalarda sonuçlardan yüksek değerdedir. Kuru fasulyedeki ^{232}Th aktivite konsantrasyonu sonucu da Nijerya ve Vietnam'da yapılan çalışmaların sonuçlarından düşük olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada ölçülen Mısır örneğindeki ^{40}K aktivitesi sonucu İran ve Sri Lanka'da yapılan çalışmaların sonuçlarından daha düşük olarak tespit edilmiştir. Yine mısır gıda örneğindeki ^{238}U aktivitesi Sri Lanka'daki çalışma dışında diğer çalışmalarda sonuçlardan yüksek çıkmıştır. Mısırdaki ^{232}Th aktivitesi sonucu da Türkiye-Muğla'da yapılan çalışma dışında diğer çalışmalarda sonuçlarla yakın değerde ölçülmüştür. Pirinç örneğindeki ^{40}K aktivitesi diğer çalışmalarda sonuçlardan daha düşük elde edilmiştir. Pirinç örneğinde tespit edilen ^{238}U aktivitesi de diğer çalışmalardan yüksek değerde iken pirinç örneğinde ^{232}Th aktivitesi tespit edilememiştir.

Çizelge 4'de kül formundaki gıda örneklerinin sonuçlarının literatürle karşılaştırılması yapılmıştır. Literatür çalışmalarında kül haline getirilerek yapılan çalışmaların az olduğu



Şekil 2. Toz ve Kül formundaki gıda örneklerinin aktivite konsantrasyonlarının karşılaştırılması, A) ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu, B) ²³⁸U aktivite konsantrasyonu ve C) ²³²Th aktivite konsantrasyonu.

çizelgede de görülmektedir. Buna göre buğday örneği için elde edilen sonuçlar İran'da yapılan çalışma ile karşılaştırıldığında ⁴⁰K aktivitesi sonucunun düşük değerde olduğu ²³⁸U ve ²³²Th aktivite sonuçlarının İran'daki çalışmadan daha yüksek olduğu görülmektedir. Muz gıda örneği sonuçlarına bakıldığında bu çalışmadaki ⁴⁰K aktivitesi sonucunun Güney Hindistan ve Endonezya'da yapılan çalışmalardaki sonuçlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Muz örneğinde diğer çalışmalarda ²³⁸U ve ²³²Th aktivitesi tespit edilirken bu çalışmada tespit edilememiştir. Pirinç örneğinde ise İran ve Güney Hindistan'da yapılan çalışmalarda ⁴⁰K ve ²³⁸U aktiviteleri tespit edilirken bu çalışmada ⁴⁰K ve ²³⁸U aktivitesi tespit edilememiştir. Bu çalışmada Pirinç örneğinde elde edilen ²³²Th aktivitesi İran'da yapılan çalışmadaki değerden daha yüksek olarak bulunmuştur.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, ⁴⁰K bakımından zengin olduğu düşünülen 7 gıda maddesi için radyonüklid aktivite konsantrasyonları, toz ve kül formu olmak üzere iki ayrı şekilde yapılmıştır.

- Toz formunda hazırlanan örneklerde ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu en yüksek kuru fasulyede (416.1 Bq.kg⁻¹) bulunurken literatürde ise toz formunda ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu en yüksek buğday gıda maddesinde (473 Bq.kg⁻¹) tespit edilmiştir. ⁴⁰K aktivite konsantrasyonunun en düşük olduğu gıda örneği literatür çalışmalarında pirinç gıda maddesidir. Bu çalışmada da en düşük ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu pirinç örneğinde (36.5 Bq.kg⁻¹) belirlenmiştir.
- Kül formunda hazırlanan örneklerdeki ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu en yüksek kuru fasulyede (2132.8 Bq.kg⁻¹) bulunurken pirinçte ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu dedekte edilememiştir. Literatür çalışmalarında kül formunda ⁴⁰K aktivite konsantrasyonunun en yüksek (136.2 Bq.kg⁻¹) ve en düşük (85.27 Bq.kg⁻¹) olduğu gıda maddesi muz olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada da en düşük ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu muz gıda örneğinde tespit edilmiştir.
- Sonuçlara bakıldığında hem toz formunda hem de kül formundaki örneklerde en yüksek potasyum aktivitesinin kuru fasulye gıda maddesinde tespit edildiği görülmektedir.

Çizelge 3. Farklı ülkelerde yapılan toz formundaki örneklerin aktivite konsantrasyonları (Bq.kg⁻¹).

Toz halindeki örnekler	Ülkeler	Aktivite Konsantrasyonu (Bq.kg ⁻¹)			Kaynaklar
		⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th	
Buğday	İran	91.73	1.67	0.5	(Changizi vd. 2013)
	Nijerya	214	3.1	-	(Hassan vd. 2020)
	Kuzey Hindistan	473	17	3	(Kaur vd. 2020)
	Türkiye-Muğla	39.88	1.19	1.44	(Altıkulaç 2021)
	Türkiye-İzmir	143.9	MDA *	MDA	Bu Çalışma
Kuru Fasulye	Nijerya	453.6	-	18.9	(Jibiri vd. 2007)
	Vietnam	379	24.8	36.1	(Van vd. 2020)
	Türkiye-Rize	739.79	0.28	0.78	(Görür vd, 2012)
	Türkiye-Muğla	370.4	1.47	0.98	(Altıkulaç 2021)
	Türkiye-İzmir	272.6	2.86	1.56	Bu Çalışma
Kırmızı Mercimek	Türkiye-Muğla	272.6	2.86	1.56	(Altıkulaç 2021)
	Türkiye	243.1	3.8	5.0	Bu Çalışma
Mısır	İran	101.52	0.81	0.85	(Changizi vd. 2013)
	Sri Lanka	160.83	<7.00	<0.75	(Jayasinghe vd. 2019)
	Türkiye-Muğla	38.12	1.19	1.98	(Altıkulaç 2021)
	Türkiye-İzmir	91.8	2.9	1.2	Bu Çalışma
Pirinç	İtalya	150	-	-	(Donatello vd. 2014)
	Sri Lanka	41.51	<4.97	<0.52	(Jayasinghe vd. 2019)
	Nijerya	90	1.7	-	(Hassan vd. 2020)
	Kuzey Hindistan	466	18	7	(Kaur vd. 2020)
	Türkiye-İzmir	36.5	12.8	MDA	Bu Çalışma

* MDA: Minimum dedekte edilebilir aktivite.

Çizelge 4. Farklı ülkelerde yapılan kül formundaki örneklerin aktivite konsantrasyonları (Bq.kg⁻¹).

Kül halindeki örnekler	Ülkeler	Aktivite Konsantrasyonu (Bq.kg ⁻¹)			Referanslar
		⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th	
Buğday	İran	88	0.028	0.04	(Abbasi ve Bashiry 2020)
	Türkiye	77.1	2.1	6.7	Bu Çalışma
Muz	Güney Hindistan	136.2	0.09	-	(Shanti vd. 2010)
	Endonezya	85.27	5.45	18.60	(Syarbaini vd, 2014)
	Türkiye	963.3	MDA *	MDA	Bu Çalışma
Pirinç	İran	102	0.035	0.075	(Abbasi ve Bashiry 2020)
	Güney Hindistan	120.2	3.07	-	(Shanti vd. 2010)
	Türkiye	MDA	MDA	11.2	Bu Çalışma

* MDA: Minimum dedekte edilebilir aktivite.

UNSCEAR 2000 raporuna göre ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th için global ortalama aktivite değerleri sırasıyla 580 Bq.kg^{-1} , 40 Bq.kg^{-1} ve 40 Bq.kg^{-1} olarak verilmiştir (Changizi vd. 2013).

- Bu çalışmada toz formundaki örneklerin doğal radyonüklid aktivite konsantrasyonları UNSCEAR tarafından verilen limit değerlerin altında bulunmuştur.
- Kül formunda hazırlanan kuru fasulye, muz ve yeşil mercimekteki ^{40}K aktivite konsantrasyonu, ayrıca kuru fasulyedeki ^{238}U aktivite konsantrasyonu UNSCEAR 2000 raporunda verilen limit değerlere göre yüksek çıkmıştır. Kuru fasulye için elde edilen ^{40}K aktivite konsantrasyonunun UNSCEAR tarafından verilen limit değerinin yaklaşık 4 katı olduğu görülmektedir. Elbette kül formundaki örnek sonuçları normal toz formundaki sonuçlara göre daha konsantre olduğu için daha yoğun aktiviteye sahiptirler. Bu çalışmanın sonuçlarının literatür çalışmalarıyla karşılaştırılabilir olduğu görülmektedir.

Gıda maddesi olarak kullanılan yiyeceklerdeki doğal radyonüklidlerden kaynaklanan aktivite konsantrasyonları gıda ürünlerinin yetiştirildiği bölgeden ve jeolojiden etkilenmektedir. Çalışmanın başında da bahsedildiği gibi yaşanan çevre karasal ve kozmik radyasyonla etkileşim halindedir. Gıda maddelerinin yetiştirildiği bölgenin denizden olan yüksekliği ve karasal radyoaktivitesi gıda ürünlerinin doğal radyonüklid konsantrasyonlarını etkilemektedir. Ayrıca gıda ürünlerinde yapılan gübreleme ve ilaçlama faaliyetleri de ürünler üzerinde radyonüklid birikimini artırma da etkili olmaktadır. Gıda maddelerinin karasal radyasyon değerleri yüksek olmayan bölgelerde ve uygun gübrelemelerle yetiştirilmesi insan sağlığı açısından önem arz etmektedir.

5. Kaynaklar

- Abbasi, A., Bashiry, V., 2020.** Estimation of cancer risk due to radiation exposure for some daily consumption of foods, *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, 16(1).
- Açıkgöz, G., 2018,** Kulakçayırı gölünün doğal radyoaktivite ve ağır metal kirliliğinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Altıkulac, A., 2021,** Analysis of natural radioactivity and determination of potassium content in foods. *Fresenius Environ. Bull.* 30 (6B):7859-7865
- Changizi, V., Shafiei E., Zareh, M.R., 2013.** Measurement of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs and ^{40}K activities of wheat and corn products in Ilam Province – Iran and Resultant Annual Ingestion Radiation Dose. *Iranian J Publ Health*, 42(8): 903-914.

- Çiçek, Ş., 2013.** Uranyum, toryum ve potasyumun taşınımı, menzili ve dağılım karakteristiklerinin belirlenmesi için matematiksel bir model, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Donatello, D., Meli, M.A., Roselli, C., Forini, N., Rongoni, A., Feduzi, L., 2014.** Natural radionuclides in Italian diet and their annual intake. *J. Radioanal. Nucl. Che.* 299: 1461-1467.
- Eroğlu, G., Şahiner, M., 2017.** Dünyada ve Türkiye’de uranyum ve toryum, maden tetkik ve arama genel müdürlüğü, maden serisi: 3, Ankara (<https://www.mta.gov.tr>).
- Görür, K.F., Keser, R., Akçay, N., Dizman, S., As, N., Okumuşoğlu, N.T.,** Radioactivity and heavy metal concentrations in food samples from Rize, Turkey, 2012. *J. Sci. Food Agric.* 92(2):307-312. Doi: 10.1002/jsfa.4576
- Hacıosmanoğlu, T., 2017.** Doğal ve yapay radyasyon kaynakları, kişisel doza katkıları. *Nucl Med Semin* 3:166-171 (<http://nukleertipseminerleri.org>) 14,06,2021
- Hassan, Y, M., Zaid, H, M., Guan, B, H., Khandaker, M, U., Bradley, D, A., Sulieman, A., Latif, Sk, A., 2020.** Radioactivity in staple foodstuffs and concomitant dose to the population of Jigawa state, Nigeria, *Radiation Physics and Chemistry*, 0969-806X
- Henriksen, T., Sagstuen, E., Pettersen, E., Malinen, E., Edin, N. J., Hole, E. O., 2013.** Radiation and Health, Oslo: *University of Oslo. Book in pdf format.*
- IAEA.,** International Atomic Energy Agency, April 2002, Natural and Induced Radioactivity in Food, *IAEA-TECDOC-1287.*
- Işık, U., 2018.** Kütahya ilinde yapı malzemelerindeki uranyum, toryum ve potasyum oranlarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Jayasinghe, C., Pinnawala, U, C., Rathnayaka, T., Waduge, V., 2020.** Annual committed effective dosage from natural radionuclides by ingestion of local food growing in mineral mining area, Sri Lanka, *Environ Geochem Health*, 42(7):2205-2214. doi: 10.1007/s10653-019-00487-0.
- Jibiri, N.N., Farai, I.P., Alausa, S.K., 2007.** Activity concentrations of ^{226}Ra , ^{238}Th , and ^{40}K , in different food crops from a high background radiation area in Bitsichi, Jos Plateau, Nigeria. *Radiation Environ. Biophys.*, 46: 53 – 59. doi: 10.1007/s00411-006-0085-9
- Kaur, S., Maheshwari, P., Mehra, R., 2020.** Dose assessment of natural terrestrial radionuclides in commonly consumed foods in north India, *Radiat Prot Dosimetry*.189(3):362-370. doi: 10.1093/rpd/ncaa050.
- Lean, G., Crick, M., Shannoun, F., Cohen-Unger, S., Evrensel A., Diesner-Kuepfer, A., 2016.** Cataloguing: Radiation: effects and sources, United Nations Environment Programme, UNEP, ISBN: 978-92-807-3517-8, Job No.: DEW/1937/NA, Corrected electronic version.

- Santawamaitre, T., Malain, D., Al-Sulaiti, H.A., Matthews, M., Bradley, D.A., Regan, P.H., 2011.** Study of natural radioactivity in riverbank soils along the Chao Phraya river basin in Thailand. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B Nucl Instrum Meth A*, 652(1): 920-924. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.10.057>
- Shanti, G., Thampi Thanka Kumaran, J., Allan Gnana Raj, G., Maniyan, C.G., 2010.** Natural radionuclides in the South Indian foods and their annual dose. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 619: 436-440. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.10.068>
- Syrbaini, Warsona, A., Iskandar, D., 2014.** Natural radioactivity in some food crops from Bangka-Belitung Islands, Indonesia, *At. Indones.* 40 (1): 27-32. <https://doi.org/10.17146/aij.2014.260>
- TAEK, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 2009.** IAEA'nın 2004 yılında yayımladığı IAEA/PI/A.75/04-00391sayılı "Radiation, People and the Environment" isimli el kitabı TAEK tarafından Türkçe'ye tercüme edilmiştir. ISBN: 978-975-8898-28-2,
- UNSCEAR, 2000b,** Exposures from Natural Radiation sources, Annex B, New York: United Nations
- Van, H. D., Nguyen, T. D., Peka, A., Hegedus, M., Csordas, A., Kovacs, T., 2020.** Study of soil to plant transfer factors of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs in Vietnamese crops, *Journal of Environmental Radioactivity*, 223-224, 106416. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106416>
- Url-1:**<https://geoinfo.nmt.edu> (New Mexico Bureau of Geology & Mineral Resources) 29.05.2021
- Url-2:** <http://hpschapters.org> (Human Health Fact Sheet) 30.05.2021
- Url-3:** <http://tr.wikipedia.org/wiki/Potasyum> (Wikipedi Özgür Aksiklopedi) 17.01.2023.



Linyit ve Taşkömürü Tozlarının Yanabilirlik ve Patlayabilirlik Açısından Değerlendirilmesi

Characterization of Lignite and Hardcoal Dusts in Terms of Flammability and Explosibility

Emre Günay*

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, biri yeraltı taşkömürü biri yeraltı linyit ocağında üretim esnasında oluşan havada asılı kalabilen ve patlamaya neden olabilecek kömür tozlarının (float dust) miktarları belirlenmiştir. Ayrıca, yeraltından alınan kömür örneklerinin kısa analizleri yapılmış, hazırlanan kömür tozlarının Hartmann aparatı kullanılarak patlayabilir nitelikte olup olmadıkları ve sıcak yüzeylerde tutuşabilirlikleri incelenmiştir. Yeraltında yapılan ölçümler sonucunda, linyit ocağında bir vardiyada oluşan havada asılı toz yoğunluklarının 14.36 mg/m³ ile 72.23 mg/m³ arasında ve ton başına oluşan havada asılı toz miktarlarının ise 9977 mg ile 26717 mg arasında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yeraltı taşkömürü ocağında yapılan ölçümlerde havada asılı toz yoğunluklarının 81.64 mg/m³ ile 269.80 mg/m³ arasında değiştiği ve ton başına havada asılı toz miktarlarının ise 79024 mg ile 278960 mg olduğu tespit edilmiştir. Hartmann aparatı ile yapılan deneyler sonucunda hem linyit hem de taşkömürü tozlarının patlayabilir nitelikte olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, kömür tozu örneklerinin sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik sıcaklıklarının örneklerin kül içeriklerine bağlı olarak 190°C ile 220°C arasında olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular kömür tozuna yönelik olarak ülkemizdeki çalışmaların artırılmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Kömür tozu, Kömür tozu patlaması, Tutuşabilirlik, Toz konsantrasyonu

Abstract

In this study, the amount of float dust that can cause coal dust explosion in two underground coal mines (one hardcoal and one lignite). Besides, a proximate analysis has been performed for the samples obtained from underground and using the Hartmann apparatus it was determined whether the coal dust samples prepared were flammable. Smoldering temperatures of the coal dust samples were also found. The measurements performed underground revealed that the amount of float dust in lignite mine was between 14.36 mg/m³ and 72.23 mg/m³ and the amount of coal dust formed per ton of coal produced was between 9977 mg and 2717 mg. For underground hardcoal mine, the amount of float dust in was between 81.64 mg/m³ and 269.80 mg/m³ and the amount of coal dust formed per ton of coal produced was between 79024 mg and 278960 mg. The test performed by Hartmann Apparatus showed that both hardcoal and lignite dusts were flammable. In addition, depending on their ash content, smoldering temperatures of coal dusts were between 185°C and 240°C. The findings obtained from the study revealed that the number of studies on coal dust should be increased in our country.

Keywords: Coal dust, Coal dust explosion, Flammability, Dust concentration

1. Giriş

Madencilik uzun yıllardır dünyada büyük önem verilen ve diğer çalışma alanlarına kıyasla daha fazla emek ve sermaye gerektiren bir endüstri koludur. Ayrıca diğer sektörlerin ihtiyacı olan hammadde ve yan ürünlerin temininde önem taşı-

maktadır. Ancak madencilik faaliyetleri, değerli madenlerin yeraltından çıkarılması, işlenmesi ve piyasaya kazandırılması aşamalarında iş sağlığı ve güvenliği açısından ciddi riskler taşımaktadır. Yeraltı madencilik faaliyetlerinde bu riskler çok daha fazladır. Yeraltında karşılaşılan gazlardan sonra en önemlisi kömür tozlarından kaynaklı olan risklerdir. Kömür tozları yeraltında çalışanlar için ciddi sağlık problemlerine, işgücü kayıplarına ve çalışma alanında verimin düşmesine neden olabilmektedir. Sağlık açısından etkilerinin yanında yeraltı çalışmalarında bir etkenle havalanarak uygun konsantrasyona ulaşan kömür tozları bir ateşleme kaynağıyla

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: emre.gunay@beun.edu.tr

Emre Günay orcid.org/0000-0001-9874-593X



tutuşması sonucu patlayarak daha tehlikeli ve ölümcül sonuçlar doğurmaktadır. Ayrıca kömür tozları, makine ve teçhizatın üzerinde birikerek kullanım ve ömürleri açısından sorunlara sebep olmakta, hatta makinelerin ısınarak sıcak yüzey oluşturdıkları noktalarda tutuşmalara sebep olarak yangın ve patlama gibi büyük sorunlara neden olabilmektedir. Bu sebeple yeraltı çalışmalarında tozla mücadele büyük önem kazanmaktadır.

Kömür tozunun patlayabilirliğinin belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalar 20. yüzyılın başlarında başlamıştır (Hartmann vd. 1997). Bu araştırmalarda temel amaç; kömür tozu patlamalarının anlaşılması, önlenmesi ve kontrol edilmesi çerçevesinde, “kömür tozunun patlayabilirliği”, “minimum patlayabilir toz konsantrasyonu gibi parametrelerinin belirlenmesine yönelik olmuştur. Kömür tozunun patlayabilirliğine yönelik deneysel çalışmalar deneysel ocaklarda yapılan çalışmalar ve laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar olmak üzere iki grupta incelenebilir.

Kömür tozu patlamalarının mekanizmasının anlaşılması ve özellikle olayda etkili olan faktörlerin anlaşılması için 20. yüzyılın ortalarında çeşitli ülkelerde başlayan deneysel ocaklardaki denemeler, bu yüzyılın sonunda özellikle Amerika Birleşik Devletleri (ABD)’nde yoğunlaşmıştır. Pittsburgh Araştırma Laboratuvarı’na ait deneysel ocakta 1980-2000 yılları arasında yapılan denemeler havada asılı duran toz (Weiss vd. 1989), minimum patlayabilir kömür tozu konsantrasyonu (Weiss vd. 1989, Cashdollar vd. 1987 ve 1992 Greninger vd. 1990) taş tozu gereksinimleri, pulverize kömür ve iri taneli kömür taneciklerinin etkileri (Weiss vd. 1989) konularında önemli temel bilgilere ulaşılmışa ön ayak olmuştur.

Yeraltı kömür madencilğinde; ayakta üretim çalışmaları esnasında, nakliyat güzergâhlarında, konveyörlerde, silolarda, çalışanların ve iş makinelerinin hareketleriyle toz oluşumu meydana gelmektedir. Kaba ve büyük toz parçacıkları hemen çökelmektedir. Fakat ince kömür parçacıkları havada asılı olarak kalabilmekte ve yeraltında havalandırma sisteminin etkisiyle daha uzun mesafelere taşınabilmektedir. Bu şekilde hareket eden tozlara “havada asılı toz” denir ve genellikle 200 mesh elekten geçen (<75 µm) kömür parçacıklarından oluşmaktadır (NIOSH 2006). Tozun 5 µm’den büyük olanları solunum yoluyla tutulmakta ve zamanla dışarı atılmaktadır. Solunabilir toz tanımı Tozla Mücadele Yönetmeliği içerisinde “Aerodinamik eşdeğer çapı 0.1–5.0 mikron büyüklüğünde kristal veya amorf yapıda toz ile çapı 3 mikrondan küçük, uzunluğu çapının en az üç katı olan lifsi tozlar” şeklinde ifade edilmiştir ve en tehlikeli toz boyutu

1-2 µm’dir (Didari 1985). Havada asılı olan tozlar patlayıcı ortam oluşturmaya sebebiyle solunabilir tozlara göre daha tehlikelidir.

Kömür tozunun patlayabilirliğine yönelik olarak laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalarda çeşitli tip ve ebatlarda birçok ekipman denenmiş olmasına rağmen (Eckhoff 2003) en sık kullanılan iki ekipman Hartmann Aparatı ve 20 L küredir. Hartmann aparatı, kömürün patlayabilirliği için ilk olarak kullanılmaya başlanmış ve 1980 öncesi dönemde bu alet kullanılarak büyük miktarda veri üretilmiştir (Lees 1996 ve 2005). Bir Hartmann aparatı; tozun hava ile içine püskürtüldüğü 1.2 L hacmindeki düşey bir tüpten oluşmaktadır. Bu tüpe bağlı ısıtılmış bir tel ya da kıvılcım üretici bir ateşleme kaynağı olarak görev almaktadır. Aparatta kömür tozu tane boyutu, minimum toz konsantrasyonu, ateşleme enerjisi, sıcaklık gibi parametrelere bağlı olarak alev ilerlemesi izlenmektedir. Aparat üzerine bir basınç dönüştürücüsü bağlanarak kömür tozunun patlamasından kaynaklanan maksimum basınç ve zamana bağlı maksimum basınç artışını $[(dP/dt)_{max}]$ da ölçmek mümkün olabilmektedir. Hartmann aparatı ve türevleri geçmişte yaygın olarak kullanılsa da sonradan bu aparatın toz dağılması ve türbülans için düzenli koşullar yaratmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca, aparatın yapısından kaynaklı olarak bir “duvar etkisi” meydana geldiği ve alevin ilk genişlemeden geçerken tüp içerisinde yukarı ve aşağı yönde hareket etmekte olduğu tespit edilmiştir (Eckhoff 2003). Bu nedenlerden dolayı bu aparatta daha düşük yanma oranları ve basınç artışları kaydedilmekte ve sonuçta elde edilen basınç artışları daha karmaşık cihazlarda elde edilen değerlerden daha az olmaktadır. Buna bağlı olarak çeşitli araştırmacılar Hartmann aparatında çeşitli değişiklikler yaparak deneyler gerçekleştirmiştir. Hartmann aparatı günümüzde halen tozların yanabilirliğini (yanabilir/yanmaz) test etmek için eleme (screening) amaçlı kullanılmaktadır. Ülkemizde kömür tozu patlamalarıyla ilgili tek bir çalışma yapılmış ve bu çalışma 20 L deney yöntemiyle yapılmıştır. Elbistan, Soma ve Tunçbilek linyit kömürlerini kapsayan çalışmanın sonucuna göre bu yerlere ait kömür tozlarının alt patlayabilirlik sınırı sırasıyla 60, 30, 60 g/m³ çıkmıştır (Ü. Abdullah ve U. Suphi 2017).

Bu çalışmada linyit ve taşkömürü olmak üzere iki kömür türü kullanılarak örneklerin karakterizasyonu ve patlayabilirliğine yönelik olarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, örneklerin kısa analizleri yapılmış, Hartmann aparatı kullanılarak patlayabilirlikleri incelenmiş ve sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca, yeraltında yapılan ölçümlerle örneklerin patlayabilir ortam

oluşturacak toz konsantrasyonları tespit edilmiş ve kazılan ton başına oluşan toz miktarları belirlenmiştir.

2. Gereç ve Yöntem

Çalışmada kullanılan linyit örnekleri dönümlü, göçertmeli tam mekanize katlı uzunayak yöntemiyle çalışan bir yeraltı linyit ocağından temin edilmiştir. Taşkömürü örnekleri ise biri ahşap tahkimatlı klasik uzunayak (A damarı), diğeri ise üretimin patlayıcı madde ile yapıldığı yarı mekanize taban ayak (B damarı) yöntemiyle çalışan iki farklı panodan temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan örneklere ait kısa analizler ASTM (D3173-17a, D3174-12, D3175-18) standartlarına uygun şekilde yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 1’de verilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar yeraltı ölçümleri ve laboratuvar çalışmaları olmak üzere iki ana başlıkta incelenecektir.

2.1. Yeraltı Ölçümleri

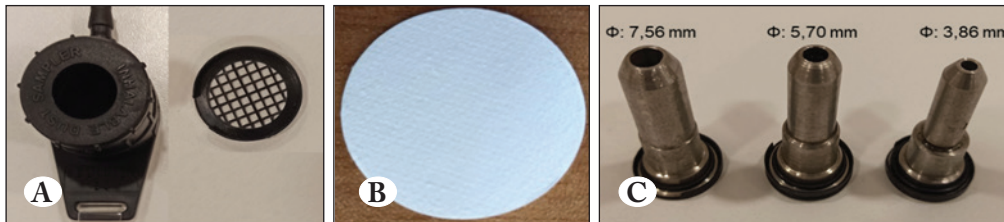
Yeraltında yapılan ölçümlerde havada asılı durabilen ve patlayıcı ortam yaratabilecek tozların (<75 µm) miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yeraltında havada asılı durabilen tozların ölçülebilmesi için geliştirilmiş özel bir cihaz bulunmadığından solunabilir toz ölçümünde kullanılan mevcut gravimetrik cihazlar üzerinde modifikasyonlar yapılmıştır. Bu amaçla çalışmada solunabilir toz ölçümünde kullanılan The Institute of Occupational Medicine (IOM)

örnekleyici başlıklar kullanılmıştır. IOM örnekleyici başlıklara cam mikrofiber membran malzemeden yapılmış, çapı 25mm, gözenek büyüklüğü 1.2 µm olan filtreler yerleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, ocakta hava hızlarının ocağın farklı kesimlerinde değişken olduğu göz önüne alınarak farklı hava hızlarında yapılacak örneklemelerin sağlıklı olabilmesi için IOM örnekleyiciye monte edilen ve çeşitli hava hızlarında (<2 m/sn, 2 m/sn - 4 m/sn, > 4 m/sn) kullanılmak üzere tasarlanmış, farklı çaplarda (Φ: 3.86 mm, 5.70 mm ve 7.56 mm) izokinetik nozüller imal ettirilmiştir (Şekil 1). İzokinetik örnekleme ilk olarak Wilcox (1956) tarafından ortaya atılmıştır. Bu teknik ile örnekleme hızının hava hızına eşit bir hale getirilmesiyle toplanan örneklerin ocak havasındaki konsantrasyonları temsil etmesi sağlanmaktadır. Zira izokinetik örnekleme yapılmazsa ocak kesimindeki hava hızına bağlı olarak toplanan örnekler ya olduğundan fazla ya da olduğundan az olmakta ve hatta havadaki toz boyutlarını temsil edememektedir (Eckhoff 2003).

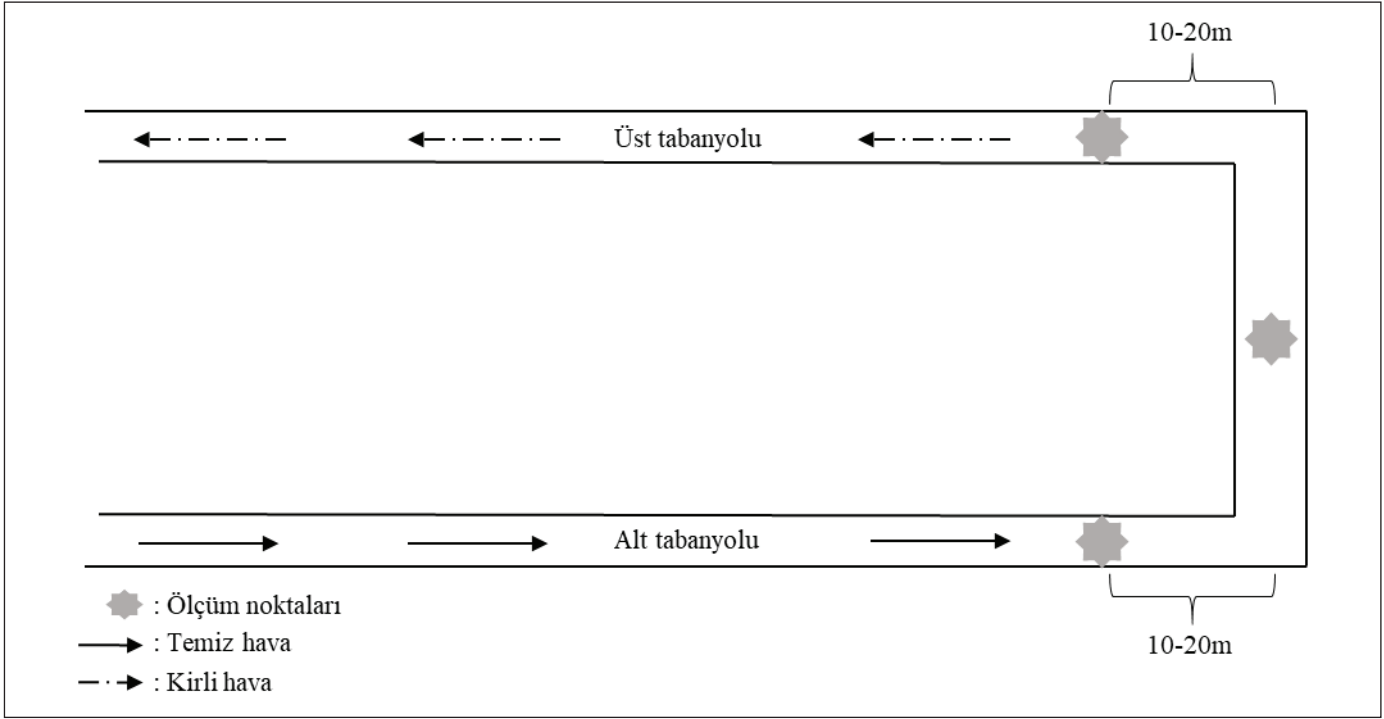
Yeraltında havada asılı duran ancak çökme ve patlayabilir ortam hazırlama potansiyeli olan tozların belirlenmesi için yapılan ölçümler, panoların hava girişleri (alt tabanyolu ve ayaktan yaklaşık 10-20m uzaklıkta), ayak ve hava dönüş yolları (üst tabanyolu ve ayaktan yaklaşık 10-20m uzaklıkta) olmak üzere üç farklı noktada gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

Çizelge 1. Ocaktan alınan kömür örneklerine ait kısa analiz sonuçları (orijinal bazda).

Örnek Yeri		Nem İçeriği (%)	Kül İçeriği (%)	Uçucu Madde (%)	Sabit Karbon (%)	
Linyit	Örnek I	II. Kat Ayak	10.60	20.00	21.63	47.77
		I. Kat Ayak	13.80	31.60	28.51	26.09
	Örnek II	II. Kat Ayak	9.00	38.21	26.88	25.91
		I. Kat Ayak	10.50	21.16	28.25	40.09
Taşkömürü	Örnek I	B Damarı	2.78	16.15	28.34	52.73
		A Damarı	2.28	9.66	27.83	60.23
	Örnek II	B Damarı	2.80	19.50	29.62	48.08
		A Damarı	2.10	9.87	28.36	59.67



Şekil 1. Çalışmalarda kullanılan (A) IOM örnekleyici başlık, (B) filtre ve (C) izokinetik nozüller.



Şekil 2. Yeraltındaki ölçüm noktalarının şematik gösterimi.

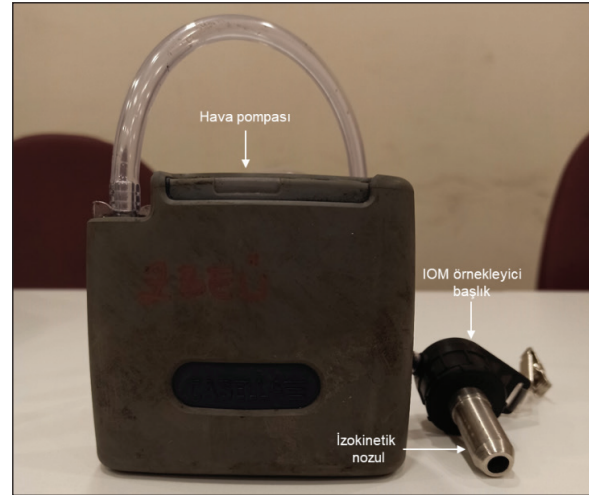
Yeraltında gerçekleştirilen ölçümlerden önce ocak içinde ölçüm yapılacak noktaların özellikleri Çizelge 2'de verilmiş ve belirlenen hava hızlarına uygun olacak şekilde izokinetik nozül seçimi yapılmıştır.

Çizelge 2'den görüleceği üzere linyit ocağının I.kat ve II.katında okunan hava hızlarına göre orta çaplı nozüller seçilmiş, taşkömürü ocağında okunan hava hızlarına göre de küçük çaplı nozüller seçilmiş ve deney setinde kullanılmıştır.

Ölçüm yapılacak noktalarda hava hızlarının tespiti ve uygun izokinetik nozül seçiminin ardından IOM örnekleycide kullanılacak filtrelerin neminin alınması için filtreler 105°C'de 30 dakika boyunca etüvde bekletilmiş ve desikatöre konularak 15 dakika soğumaları sağlanmıştır. Daha sonra nemi giderilen filtreler ve nozüller IOM örnekleyci başlıklara monte edilerek ölçüm için kullanılacak hava pompalarına (Casella APEX 2 Plus) bağlanmıştır (Şekil 3).

Ölçümlerde kullanılan Casella APEX 2 Plus hava pompaları 1014 mbar basınçta çalışmakta ve azami 5.0 L/dk emiş kapasitesine sahiptir. Çalışma kapsamındaki ölçümlerde kullanılan hava pompaları 2.5 L/dk emişte çalıştırılmıştır.

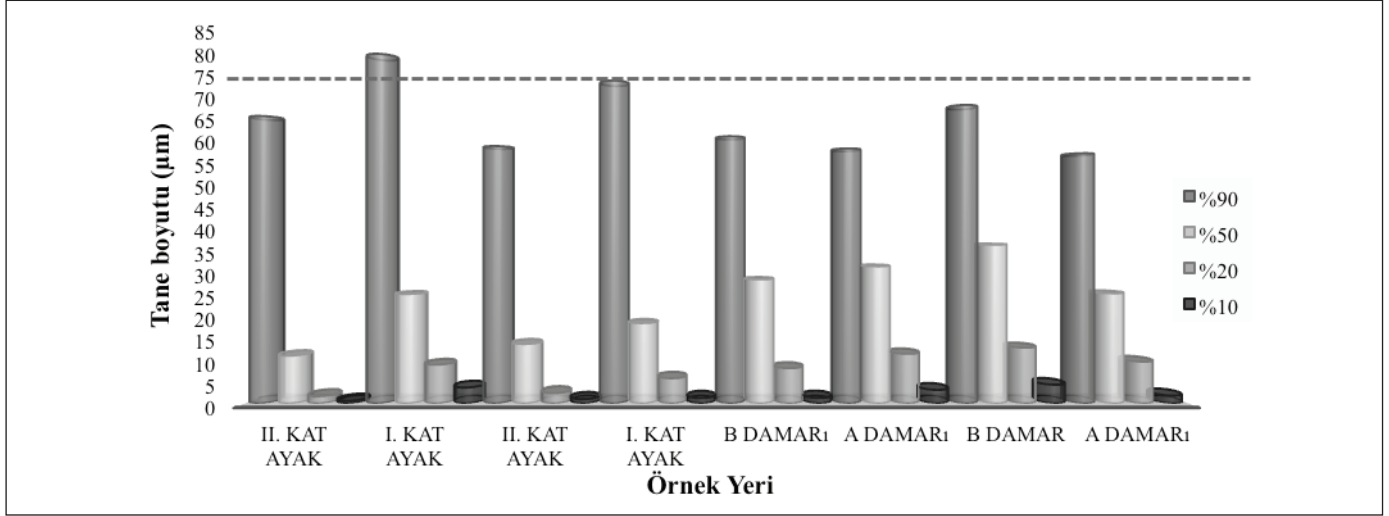
Hazırlanan ölçüm setleri ile üretim vardiyaları sırasında Şekil 2'de şematize edilen noktalarda havanın en yoğun olarak aktığı noktaya kesitin ağırlık merkezine yakın bir şekilde tahkimat ekipmanlarına sabitlenerek asılmış ve ayaklardaki



Şekil 3. Patlayabilir ortam yaratabilecek tozları ölçmek için yeraltında kullanılan set.

Çizelge 2. Toz ölçümü yapılan noktalara ait bilgiler.

Örnek Noktası	Hava Miktarı (m ³ /sn)	Hava Hızı (m/s)	Kesit (m ²)	
Linyit	I.Kat	9.8	2.88	3.4
	II.Kat	12.78	3.00	4.26
Taşkömürü	A damarı	4.17	1.1	3.74
	B Damarı	3.67	0.9	4.08



Şekil 4. Örnek hazırlama işlemine tabi tutulan örneklerin tane boyutu analiz sonuçları.

mevcut çalışma koşullarına bağlı olarak 206-351 dakika sürelerle toz örneklemeleri gerçekleştirilmiştir.

2.2. Laboratuvar Çalışmaları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları, kömür tozunun patlayabilirliğini belirlemek için Hartmann aparatında yapılan deneyleri ve ocaklardan temin edilen kömür tozlarının sıcak yüzeylerde tutuşmaya başladığı sıcaklığı (smoldering temperature) belirlemek için gerçekleştirilen deneyleri içermektedir. Bu amaçla, yeraltında ayaklarda alınan kömür örnekleri kırma, öğütme ve eleme işlemlerine tabi tutulmuş ve hazırlanan kömür tozu örneklerinin %90'ının 75 µm'nin altında olduğunu teyit etmek için boyut analizi yapılmıştır (Şekil 4). Örnek hazırlama işlemi sonrasında yapılan boyut analizlerinde linyit kömürü I. Kat ayak örneği hariç tüm örneklerin istenen boyutta olduğu tespit edilmiş, linyit kömürü I. Kat ayak örneği tekrar eleme işlemine tabi tutularak istenilen boyuta gelmesi sağlanmıştır.

2.2.1 Hartmann aparatında gerçekleştirilen deneyler

Çalışma kapsamında ocaktan alınan kömür ve toz örneklerinin patlayabilirliklerinin belirlenebilmesi amacıyla deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere ASTM- E789-95 (2019) standardına uygun şekilde bir "Hartmann Aparatı" imal ettirilmiş ve kullanılmıştır (Şekil 5). Patlayabilirlik deneylerinde kullanılacak örnekler ilgili standartta belirtildiği üzere, Hartmann aparatının hacmi (0.00123 m³) de dikkate alınarak, 0.123 g, 0.246 g, 0.615 g, 1.23 g ve 2.46 g şeklinde tartılarak gruplanmış, deneyler bu miktarlar temel alınarak gerçekleştirilmiş ve patlamaya yol açan miktarlar tespit edilmiştir. Bu miktarlara karşılık gelen toz miktarları ise 100, 200, 500, 1000 ve 2000 g/m³tür.



Şekil 5. Patlayabilirlik deneylerinde kullanılan Hartmann Aparatı.

Hartmann Aparatında gerçekleştirilen her deneyden önce aparatın bağlantıları hava kaçağı açısından test edilmiştir. Sistemde herhangi bir hava kaçağının olmadığı teyit edildikten sonra önceden hazırlanmış kömür örnekleri aparata

tın besleme bölümüne homojen şekilde yerleştirilmiştir. Bağlantı civataları sıkıldıktan sonra deneyde kullanılacak hava kompresörü çalıştırılarak hava basıncı 8 bar'a (120 psi) ayarlanmıştır. Daha sonra kumanda düğmeleri kullanılarak kömür tozu örnekleri Hartmann Aparatının yanma haznesine verilmiş ve bunu hemen takiben ateşleme kaynağı ateşlenmiş ve kömür tozu örneklerinin patlayıp patlamadıkları gözlenmiştir.

2.2.2 Sıcak yüzeylerde tutuşabilirliğin belirlenmesi

Kömür tozlarının tabaka halinde çalışmakta olan çeşitli ekipman üzerinde birikmesi ve özellikle ekipmanın çalışmasından kaynaklı olarak ısınan kısımlarda birikmesi sonucu kömür tozu tutuşabilmektedir. Herhangi bir etkiyle bu durumdaki toz tabakasının havalanmasıyla yanan toz, havada asılı duran yanabilir özellikte bir toz bulutuyla temas ettiğinde bir toz patlaması yaratabilmektedir. Bu durum ise özellikle yeraltı ocaklarında riski arttırmaktadır.

Kömür tozlarının sıcak yüzeylerde tutuşabilirliğinin belirlenmesi için ASTM E2021-15 (2015)'te tarif edildiği şekilde tasarlanan bir düzenek kullanılmıştır (Şekil 6). Bu düzenek, kimyasallara dayanıklı ve sıcaklığı 0-500°C arasında değişen, ayarlanabilir bir ısıtıcı tabla, ısı iletkenliği yüksek bir metal plaka, 10 cm çapta ve 12.4 mm yükseklikte ısı iletkenliği yüksek metal halka, iki saniyede bir veri kaydeden, 4 girişli bir termometre ve -50/+1100°C arasında çalışan K tipi iki adet termociftten oluşmaktadır.

Deneyler, %90'ı 75 µm altındaki kömür tozu örneklerinin bir spatula yardımıyla halkadan taşmayacak ve üzeri düz

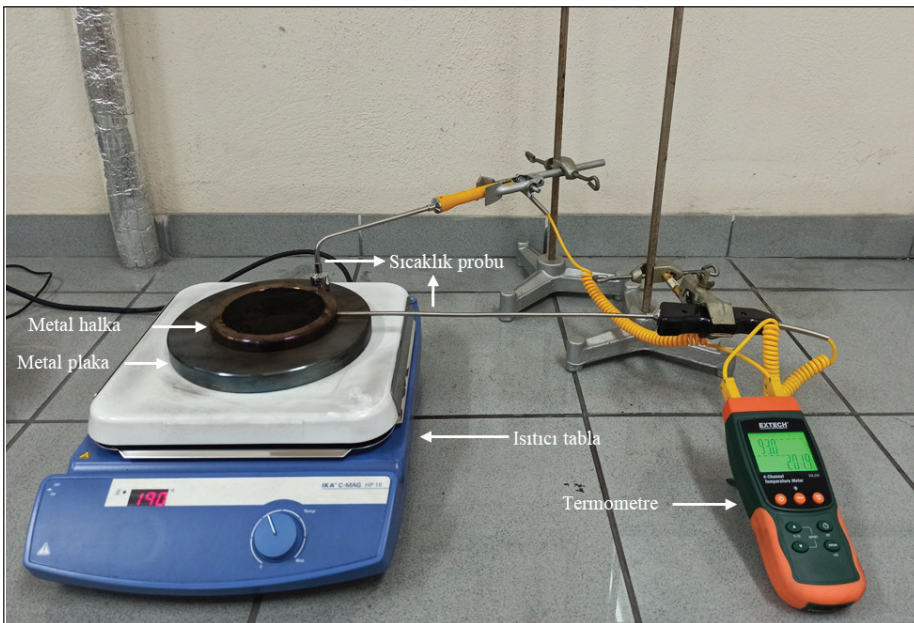
olacak şekilde, ortalama 40-60 g kömür tozu örneklerinin yerleştirilmesiyle başlatılmıştır. İlgili standartta belirtildiği üzere örneklerin deney düzeneğine yerleştirilmesi işlemi iki dakikayı aşmayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kömür tozu örnekleri yerleştirildikten sonra hem sıcak yüzeyin hem de kömür tozunun sıcaklığı zamana bağlı olarak ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Tutuşabilirlik derecesinin belirlenmesi için 10'ar °C'lik sıcaklık artışlarıyla deneyler yapılmış ve tutuşmanın olmadığı sıcaklık bulunana kadar deneylere devam edilmiştir. Deneylere; kömür tozunda herhangi bir kendiliğinden ısınma ya da yanma (korlaşma) işareti görülene kadar devam edilmiştir. Kendiliğinden ısınma, yoğun ve ağır bir duman çıkışı (Şekil 7) ya da kömür tozunun aniden artan sıcaklığıyla anlaşılabilir. Bu işaretlerden herhangi birinin gerçekleşmesiyle deneyler sonlandırılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

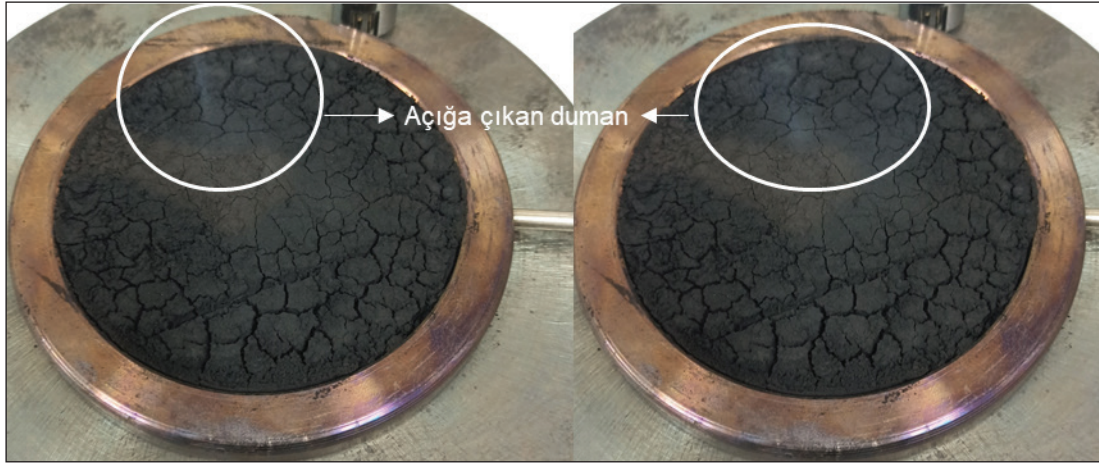
Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar bu bölümde yeraltı çalışmaları ve laboratuvar çalışmaları olmak üzere ayrı ayrı verilmiştir.

3.1. Yeraltı Çalışmaları

Yeraltında panoların alt taban yolları, ayaklar ve üst taban yollarında üretim vardiyaları sırasında havada asılı duran ancak patlayabilir ortam hazırlama potansiyeli olan tozların miktarlarının belirlenmesi için yapılan ölçümlerin sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.



Şekil 6. Kömür tozlarının sıcak yüzeylerde tutuşabilirliğinin belirlenmesi için hazırlanan deney seti.



Şekil 7. Deney esnasında açığa çıkan duman.

Çizelge 3. Yeraltında yapılan ölçümlerin sonuçları ve hesaplamalar.

Ölçüm Yeri		Filtrede Biriken Toz Miktarı (mg)	Örnekleme Süresi (dk)	Pompadan Geçen Hava Miktarı (m ³ /dk)	Havada Asılı Toz Yoğunluğu (mg/m ³)	Kesitten Geçen Hava Miktarı (m ³ /dk)	Kesitten Geçen Hava Miktarına Göre Biriken Toz Miktarı (g)	Ortalama Üretim (ton)	Havada Asılı Toz Oluşum Miktarı (mg/ton)	
		(A)	(B)	(C)	A/(B*C)	(D)	E=[(D*A)/C]/1000	(F)	(E/F)*1000	
Linyit	I. Kat	Hava Girişi	12.6	351	0.0025	14.36	580	2923.2	293	9977
		Ayak	12.4	330	0.0025	15.03	637	3159.5	275	11489
		Hava Dönüşü	12.0	324	0.0025	14.82	694	3331.2	270	12338
	II. Kat	Hava Girişi	21.3	220	0.0025	38.73	814	6935.3	428	16204
		Ayak	34.9	225	0.0025	62.04	767	10707.3	438	24446
		Hava Dönüşü	37.2	206	0.0025	72.23	720	10713.6	401	26717
Taşkömürü	A Damarı	Hava Girişi	60.4	252	0.0025	95.88	220	5315.2	50	106304
		Ayak	158.5	235	0.0025	269.80	220	13948.0	50	278960
		Hava Dönüşü	44.9	220	0.0025	81.64	220	3951.2	50	79024
	B Damarı	Hava Girişi	94.2	220	0.0025	171.28	250	9420.0	92	102391
		Ayak	112.8	212	0.0025	212.84	250	11280.0	88	128182
		Hava Dönüşü	69.0	205	0.0025	134.64	250	6900.0	85	81176

Çizelge incelendiğinde ölçümlerin gerçekleştirildiği yeraltı linyit ocağında bir vardiyada oluşan havada asılı toz yoğunluklarının 14.36 mg/m^3 ile 72.23 mg/m^3 arasında değiştiği görülmüştür. Ayrıca, ton başına oluşan havada asılı toz miktarlarının ise 9977 mg ile 26717 mg arasında olduğu belirlenmiştir. Yeraltı linyit ocağında yapılan ve I. Kat'a ait ölçümlerin belirli bir kısmında kesici yükleyicide oluşan bir sorun nedeniyle üretime ara verilmiştir. Bu nedenle bu örneğe ait ölçümlerde ayakta oluşan toz miktarları II. ayak örneklerine oranla düşük çıkmıştır. Yeraltı taşkömürü ocağında yapılan ölçümlerde ise havada asılı toz yoğunluklarının linyit ocağına oranla daha yüksek olduğu ve toz yoğunluklarının 81.64 mg/m^3 ile 269.80 mg/m^3 arasında değiştiği ve ton başına havada asılı toz miktarlarının ise 79024 mg ile 278960 mg olduğu tespit edilmiştir. Taşkömürü ocağında toz oluşum miktarlarının linyit ocağına göre yüksek çıkmasının önemli bir nedeninin ayaktaki düşük hava hızları olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, örneklerin nem içeriklerinin de bu sonuca etkisi olduğu kanaatine varılmıştır. Örneklerin nem içerikleri incelendiğinde (Çizelge 1) taşkömürü örneklerinin nem içeriklerinin linyit örneklerine göre yaklaşık 5-6 kat düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, linyit ocağında tam mekanize kazı yapılması nedeniyle kesici yükleyici üzerinde bulunan su fisketelerinin kullanılmasının üretim esnasında oluşan tozu bastırmada etkili olmasının da bir diğer etken olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 3'den de görüleceği üzere linyit ocağında II. kat ayak, taşkömürü ocağında ise, A ve B damarı ölçümlerinde hava giriş noktasında yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçların, hava dönüş noktasında yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlardan yüksek çıktığı görülmüştür. Linyit ocağında yeterli miktarda hava hızı olmasına rağmen hava dönüş yolunda ve hava giriş yolunda bulunan kapıların ve ayrıca hava girişte bulunan bant sisteminden dolayı hava girişte yapılan ölçümlerin hava dönüşüne göre yüksek çıktığı düşünülmektedir. Taşkömürü ocağında her iki kömür damarı için de hava hızının düşük olması nedeniyle tozların taşınmadığı ayrıca yarı mekanize taban ayak olarak çalışan B damarında ayakların dilimle ve üçgen şeklinde hava dönüş yollarından dönmesi nedeniyle düşük çıktığı düşünülmektedir.

3.2. Laboratuvar Çalışmaları

3.2.1 Patlayabilirlik deneyi

Çalışma kapsamında ocaktan alınan kömür ve toz örneklerinin patlayabilirliklerinin belirlenebilmesi için Hartmann Aparatı kullanılmıştır. Daha öncede anlatıldığı gibi Hartmann aparatının hacmi (0.00123 m^3) de dikkate alınarak

0.123 g , 0.246 g , 0.615 g , 1.23 g ve 2.46 g şeklinde tartılarak gruplanmış ve deneyler bu miktarlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu miktarlara karşılık gelen toz miktarları ise sırasıyla 100 , 200 , 500 , 1000 ve 2000 g/m^3 'tür.

Ayıklardan alınan örnekler için orijinal bazda ve nemi giderilmiş olarak deneyler gerçekleştirilmiş ve deneylere ait sonuçlar Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelge incelendiğinde hem linyit ve hem de taşkömürü tozlarının patlayabilir nitelikte olduğu tespit edilmiştir. Orijinal nemli linyit kömürünün 163.90 g/m^3 ile 182.76 g/m^3 konsantrasyonlarda patlayabilir olduğu görülmüştür. Nemi giderilen örnekler ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda patlama konsantrasyonlarının ortalama %40 oranında azaldığı ve örneklerin 100.98 g/m^3 ile 103.25 g/m^3 konsantrasyonlarında patlayabilir olduğu belirlenmiştir. Linyit ocağı II. kat ayaktan alınan ikinci örneğin patlayabilir olmadığı tespit edilmiştir. Bu durumun örnek alındığı sırada ayakta taş kesimi yapılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Alınan örneğe ait kısa analiz sonuçları incelendiğinde bu örneğe ait kül içeriğinin diğer örneklerden neredeyse iki kat fazla olması da bu durumu destekler niteliktedir.

Taşkömürü örneklerine ait sonuçlar incelediğinde, A ve B damarları arasında ve ayrıca nemli ve nemsiz taşkömürü örneklerinin patlama miktarları arasında çok fazla fark olmadığı belirlenmiştir. Bu örneklerle ait kısa analiz sonuçları incelendiğinde tüm örneklerin nem içeriklerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Hartmann aparatı ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda taşkömürü örneklerinin 75.28 g/m^3 ile 83.98 g/m^3 konsantrasyonları arasında patlayabilir nitelikte oldukları tespit edilmiştir.

3.2.2 Sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik deneyi

Tozların çalışmakta olan ekipmanların sıcak yüzeylerinde birikip tutuşarak hem patlama hem de yanma riski teşkil etmesinden dolayı bu çalışmada ASTM E2021-15 (2015)'te tarif edilen yöntemle tozların sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik alt sınırları incelenmiştir. Ayaktan alınan ve örnek hazırlama işlemleri sonucu $75 \text{ } \mu\text{m}$ nin altında öğütülen kömür tozu örnekleri bir spatula yardımıyla iki dakika içinde metal halkanın içine taşmayacak ve üzeri düz olacak şekilde konulduktan sonra deney başlatılmıştır. Deneye başladıktan sonra hem sıcak yüzeyin hem de kömür tozunun sıcaklığı zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Deneye, kömür tozu üzerinde kendiliğinden ısınma veya korlaşma belirtisi görülene kadar devam edilmiştir. Bu işaretlerden herhangi biri gerçekleştiğinde deneyler sonlandırılmıştır. Tutuşabilirlik derecesinin belirlenebilmesi için $10^{\circ}\text{ar } ^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklıklarda deneyler ya-

pılmış ve tutuşabilirliğin olmadığı sıcaklık bulunana kadar deneylere devam edilmiştir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler Çizelge 5'te verilmiştir.

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Teftiş Kurulu Başkanlığının Yeraltı ve Yerüstü Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberinde (2010) "Kullanılan aletlerin yüzey sıcaklığı metan ve kömür tozuna göre dizayn edilecektir. Kömür tozu var ise 150 °C yok ise 450 °C olabilmektedir." denmektedir. Sözü edilen rehberde belirtildiği üzere

kömür tozu varlığının olduğu noktalarda çalışacak aletlerin sıcaklıklarının 150°C'yi geçmesi istenmemektedir. Çizelge 5'te verilen sonuçlar incelendiğinde ayakta alınan kömür örneklerinin sıcak yüzeylerde tutuşma sıcaklıklarının 190-220°C olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler incelendiğinde çalışmalarda kullanılan kömür tozlarının çalışmakta olan aletlerin üzerine biriktiğinde ve aletlerin çalışma esnasında 190°C'ye kadar ısındığında tutuşmaya başlayacağı anlaşılmıştır. İş Teftiş Kurulu Başkanlığının Yeraltı ve Yerüstü

Çizelge 4. Ocaktan alınan kömür örneklerinin patlayabilirlik deney sonuçları.

		Örnek Yeri	Nem (%)	Alt Patlama Sınır Konsantrasyonu (g/lit)	Karşılık Gelen Toz Konsantrasyonu (g/m ³)
Linyit	Ölçüm I	II. Kat Ayak	10.60	0.2016	163.90
			Yok	0.1270	103.25
		I. Kat Ayak	13.80	0.2248	182.76
			Yok	0.1242	100.98
	Ölçüm II	II. Kat Ayak	9.00	--	--
			Yok	--	--
		I. Kat Ayak	10.50	0.2210	179.67
			Yok	0.1259	102.36
Taşkömürü	Ölçüm I	B Damarı	2.78	0.1033	83.98
			Yok	0.0988	80.33
		A Damarı	2.28	0.0959	77.97
			Yok	0.0960	78.05
	Ölçüm II	B Damarı	2.80	0.0951	77.32
			Yok	0.0944	76.75
		A Damarı	2.10	0.0942	76.59
			Yok	0.0926	75.28

Çizelge 5. Toz tabakalarının sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik deneyi sonuçları.

		Örnek Yeri	Sıcak Yüzeylerde Tutuşabilirlik Sıcaklığı (°C)	Tutuşmaya Başladığı Sıcaklık (°C)
Linyit	Örnek I	II. Kat Ayak	200	188,2
		I. Kat Ayak	190	178,2
	Örnek II	II. Kat Ayak	240	220,6
		I. Kat Ayak	190	179,9
Taşkömürü	Örnek I	B Damarı	220	204,4
		A Damarı	210	170,1
	Örnek II	B Damarı	210	191,6
		A Damarı	210	184,1

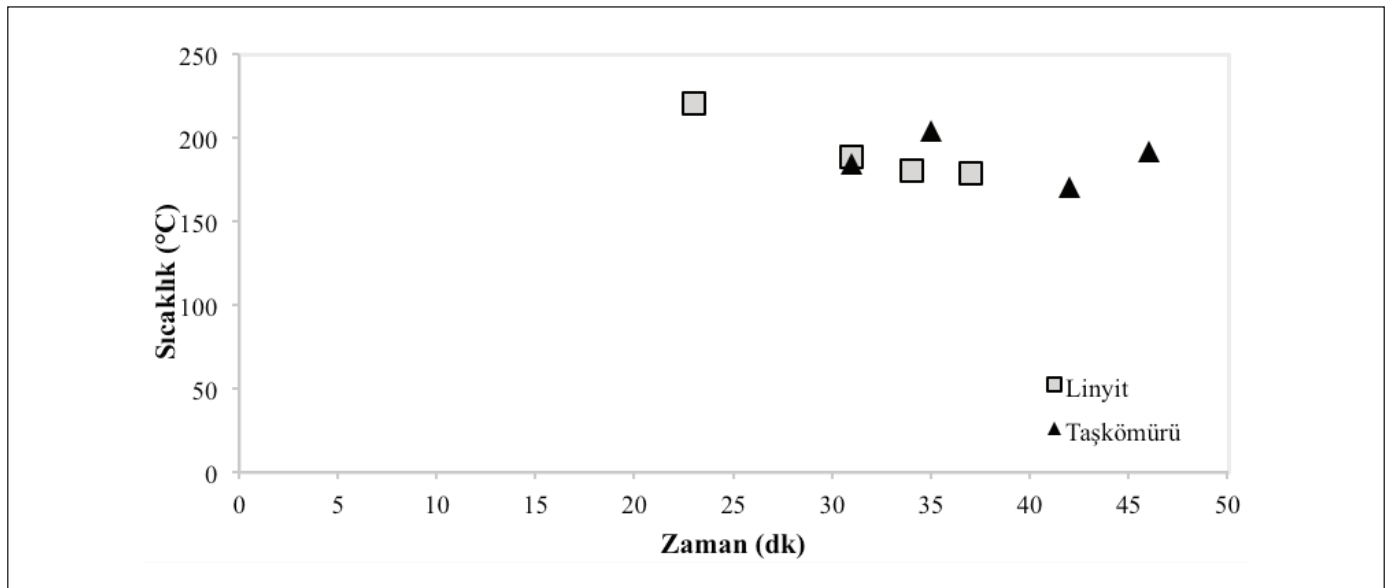
Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberinde belirtilen alt sınır değerine yakın değerler çıkmıştır.

Ayrıca yapılan sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik deneyleri sırasında, deney başlangıcından kömür tozunun tutuşma anına kadar geçen süreler belirlenmiş ve kömür tozu örneklerinin ne kadar sürede tutuşmaya başladığı incelenmiştir (Şekil 8). Buna göre linyit örneklerinin deney başlangıcından 23-37 dakika sürede tutuşmaya başladığı ve ortalama tutuşma başlangıç sıcaklığının 31.25 dakika olduğu belirlenmiştir. Buna karşın taşkömürü örneklerinin deney başlangıcından 31-46 dakika sürelerde tutuşma işareti gösterdiği ve ortalama tutuşma başlangıç sıcaklığının 38.5 dakika olduğu tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, biri linyit ve diğeri taşkömürü ocağı olmak üzere iki farklı yeraltı ocağından elde edilen linyit ve taşkömürü tozlarının patlayabilirlikleri ve sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, yeraltında yapılan ölçümlerle ocaklarda üretim sırasında oluşan, kömür tozu patlamalarına neden olabilecek boyutları ($<75 \mu\text{m}$) ve havada asılı durabilen kömür tozlarının oluşum miktarları belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuç ve öneriler özet olarak aşağıda sunulmuştur.

- Ölçümler sonucunda her iki ocaktan alınan kömür tozu örneklerinin patlayabilir nitelikte oldukları belirlenmiştir. Bu nedenle kömür tozlarının iş sağlığı ve güvenliği açısından bir risk teşkil edebileceği söylenebilir.
- Taşkömürü ocağında yapılan havada asılı kalabilen ve patlamaya neden olabilecek nitelikteki toz miktarları linyit ocağındakilere göre oldukça yüksektir. Bunun en önemli nedeninin ayaktaki hava hızlarının düşük olması olduğu düşünülmektedir. Ayaklarda oluşan toz miktarları açısından, linyit ocağında ayaktaki hava hızlarının (I. Kat 2.88 m/s, II. kat 3.0 m/s) yeraltı taşkömürü ocağı ayaklarındaki hava hızlarına göre (klasik ayak 1.1 m/s, yarı mekanize ayak 0.9 m/s) ideal olduğu açıktır. Bu sonuçlar, toz oluşumu açısından hava hızının etkisini bir kez daha ortaya çıkarması açısından önemlidir.
- Çalışmada kullanılan taşkömürü örnekleri linyit örnekleri ile karşılaştırıldığında taşkömürü tozlarına ait patlayabilirlik alt sınırlarının linyit örneklerine göre oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma özellikle taşkömürü örneklerinin oldukça düşük nem ve kül içeriklerinin neden olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda kömür tozu örneklerinin nemli bir pozisyonda tutulmalarının patlayabilirlik açısından olumlu etki yaptığı söylenebilir.
- Sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik deneylerinden elde edilen sonuçlar, her iki ocakta da tozların makine ve teçhizat üzerinde birikerek ısınmasıyla tutuşmaya sebep olacak düzeyde olabileceğini ve bu nedenle bu konuya azami dikkat gösterilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır.
- Her iki ocaktan alınan kömür tozu örneklerinin patlamaya veya yangına neden olabilecek nitelikte olması nedeniyle kömür tozlarının oluşumunun ve makine-teçhi-



Şekil 8. Kömür tozlarının tutuşmaya başladıkları zaman ait sıcaklık zaman grafiği.

zat üzerinde birikmesinin engellenmesi gerektiği açıktır. Bu nedenle yeraltında solunabilir tozla mücadele yöntemlerinin, patlayabilir nitelikteki kömür tozunun oluşumu ve sıcak yüzeylerde tutuşabilirlikle mücadelede de etkin rol oynayacağı söylenebilir. Bu amaçla, yeraltında yapılacak olan ilkel temizleme yöntemlerinin bile (faraş, kürek, fırça vb. aletlerle temizleme) etkili olabileceği düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında kullanılan Hartmann aparatı çeşitli yapısal etkiler nedeniyle günümüzde sadece eleme (screening) amaçlı kullanılmaktadır. Kömür tozu örneklerinin alt patlama sınırlarının ve patlama basınçlarının daha doğru tespiti için 20 L küre ile gerçekleştirilecek deneyler önerilmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında Hartman aparatı ile elde edilen alt patlama sınırları rakamsal olarak değil örneklerin patlayabilir nitelikte olup olmadığını göstermesi açısından değerlendirilmelidir.

Kömür tozu patlamalarının felaketlere sebep olması nedeniyle dünya madencilik endüstrisinde yeraltı kömür ocaklarında kömür tozlarının karakterizasyonu ve patlayabilirliği konusunda yoğun çalışmalar sürerken ülkemizde bu tür çalışmaların sayısı oldukça azdır. Ülkemizdeki çalışmalar yönetmelikler kapsamında sadece solunabilir toza yönelik durumdadır. Kömür tozu patlamalarının yıkıcı etkileri düşünüldüğünde bu konuya yönelik çalışmaların artırılmasının gerekliliği ortadadır. Buna yönelik olarak endüstri ve üniversite işbirlikleri ile konuya yönelik daha detaylı araştırmalar yapılması gerekmektedir.

5. Teşekkür

Yazar, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi'ne (Proje No: 2019-29011448-01) çalışma kapsamında sağladığı destek için teşekkürlerini sunar.

6. Kaynaklar

- ASTM, 2015.** Standard test method for hot-surface ignition temperature of dust layers, American Standards for Testing Materials, E2021-15.
- ASTM, 2017.** Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke, American Standards for Testing Materials, D3173-17a.
- ASTM, 2018.** Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke, American Standards for Testing Materials, D3174-12.
- ASTM, 2018.** Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke, American Standards for Testing Materials, D3175-18.

- ASTM, 2019.** Standard Test Method for Minimum Autoignition Temperature of Dust Clouds, American Standard Testing Methods, E1491-06 (Reapproved 2019).
- Cashdollar, K. L., Sapko, M. J., Weiss, E. S., Hertzberg, M. 1987.** Laboratory and mine dust explosion research at the Bureau of Mines, In Industrial dust explosions, STP 958, West Conshocken, PA: American Society for Testing Materials.
- Cashdollar, K. L., Weiss, E. S., Greninger, N. B., Chatrathi, K. 1992.** Laboratory and large-scale dust explosion research. *Plant/Operations Progress*, 11(4): 247-255.
- ÇSGB, 2010.** Yeraltı ve Yerüstü Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Teftiş Kurulu Başkanlığı, Yayın no: 43, 140s.
- Didari, V. 1985.** Kömür Tozu Patlaması, *Madencilik*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, 24 (4): 23-29.
- Eckhoff, R. K. 2003.** Dust Explosions in the Process Industries, 3rd edition, Gulf Professional Publishing, USA, 2003. ISBN 0-7506-7602-7.
- Greninger, N. B., Cashdollar, K. L., Weiss, E. S., Sapko, M. J. 1990.** Suppression of dust explosions involving fuels of intermediate and high volatile content. In Proceedings of the fourth international colloquium on dust explosions, *Polish Academy of Sciences*, Porabka-Kozubnik, Poland, November 4-9, pp. 208-228.
- Hartman, L. H., Muutmansky, J. M., Ramani, R. V., Wang, Y. J. 1997.** Mine ventilation and air conditioning, 3rd edition, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Lees, F. P. 1996.** Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control, 2nd edition, Elsevier, Oxford, UK.
- Lees, F. P. 2005.** Lees' Loss Prevention in the Process Industries Hazard Identification, Assessment and Control, 3rd edition, Elsevier, Oxford, UK.
- NIOSH, 2006.** Float Coal Dust Explosion Hazards, *Milestones in Mining Safety and Health Technology*, DHSS, Publication No.2006-125.
- Ü. Abdullah ve U. Suphi. 2017.** Investigation of explosibility characteristics of some Turkish lignitecoal dusts, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 39 (21): 2039-2045.
- Weiss, E. S., Greninger, N. B., Sapko, M. J. 1989.** Recent dust explosion studies the Lake Lynn experimental mine. In Proceedings of the 23rd international conference of safety in mines research institutes, U.S. Department of Interior, *Bureau of Mines*, Washington, DC, September 11-15, pp. 843-856.
- Wilcox, J. 1956.** Isokinetic flow and sampling. *Journal of The Air Pollution Control Association*, 5:4, 226-245. Doi: 10.1080/00966665.1956.10467715



Road Density Calculations with Unidimensional LiDAR Sensor for Dynamic Intersection Management

Dinamik Kavşak Yönetimi İçin Tek-Yönlü LiDAR Sensör ile Yol Yoğunluk Hesabı

Abdulkadir Cildir^{1*} , Mesud Kahrıman² , Mesut Tıgdemir³ 

¹Trakya University, Vocational Collage of Technical Sciences, Department of Electronic and Automation, Edirne, Turkey

²Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronic Engineering, Isparta, Turkey

³Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Isparta, Turkey

Abstract

The main aim of dynamic intersection management is to make instant detection of vehicles both at the intersection and approaching it. In this sense, vehicle detection sensors have been preferred for dynamic intersection management. Among these sensors, LiDAR (light detection and ranging) sensors are used in many different areas, but also focus on vehicle density detection at intersections. In this article, a unidimensional LiDAR sensor system that can detect the number, velocity, and class of vehicles at intersections with different densities and also the length of vehicle queues that may occur at this intersection has been studied. In this study, 96.36 % success has been obtained in the detection of the velocity, and 96.35 % success has also obtained in the queue detection. This study stands out in terms of price and performance with its unidimensional LiDAR system, which has the features of a 3D LiDAR sensor.

Keywords: Dynamic intersection management, Unidimensional LiDAR sensor, Queue length detection

Öz

Dinamik kavşak yönetimi, kavşaktaki ve kavşağa yaklaşmakta olan araçların anlık tespit edilmesinden geçmektedir. Bu anlamda dinamik kavşak yönetimi için araç tespit sensörleri tercih sebebi olmuştur. Bu sensörlerden LiDAR (ışık tespiti ve menzil tayini) sensörler birçok farklı alanda kullanılmakla birlikte kavşaklardaki araç yoğunluk tespiti üzerinde de durmaktadır. Bu makalede farklı yoğunluklara sahip kavşaklardaki araçların sayısını, hızını, sınıfını ve yine bu kavşakta oluşabilecek olan araç kuyruklarının uzunluğunu tespit edebilen tek boyutlu LiDAR sensörlü bir sistem üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmada hız doğruluk tespitinde % 96.36, kuyruk uzunluğu tespitinde ise % 96.35 başarı elde edilmiştir. Bu çalışma 3D LiDAR sensörün özelliklerine sahip tek boyutlu LiDAR sistemi ile fiyat ve performans açısından öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dinamik kavşak yönetimi, Tek boyutlu LiDAR sensör, Kuyruk boyu tespiti

1. Introduction

Today, with the crowded cities and the continuous increase in the number of cars, it has become a necessity to increase the number of existing roads or to use the existing road capacity in the best way. In addition, many factors such as the increase in the number of accidents, high fuel costs, travel

stress, and environmental problems accelerate this process (Akanbi and Olajubu 2012).

The best way to use road capacity is through the management of intersections. Intersections are one of the most basic elements that connect the city and determine the traffic flow rate in the city. For intersection management, it is extremely important to determine the traffic signal times by detecting the vehicle density at the intersection. Determination of traffic signal times is carried out by two different methods. In the first type of system, fixed traffic light cycle times operate independently of the environment. In the second type of signal systems, light and cycle times are changed depending on the environment. Vehicle densities on the intersection and the roads connected to the intersection are

*Corresponding author: abdulkadircildir@trakya.edu.tr

Abdulkadir Cildir  orcid.org/0000-0003-1789-6088

Mesud Kahrıman  orcid.org/0000-0003-0731-0936

Mesut Tıgdemir  orcid.org/0000-0002-5303-2722



detected by sensors in signal times depending on the environment. Green light durations are increased on roads with high vehicle density, and solutions are offered by increasing red light durations on roads with low vehicle density (Chiu and Chand 1993).

Said sensors can be divided into two sensors that are destructive to the road and those that are non-destructive to the road. Sensors such as magnetic detectors, pneumatic road tubes, piezoelectric and inductive loop (IDL) are destructive ones. These sensors, as the name suggests, are placed under the highway by stopping the traffic. They take up a lot of space, consume power, and the road must be closed to traffic for their installation and maintenance. It also has systems based on highway geometry. The highway disruptions caused by this system can make the data unreliable (Cheung and Varaiya 2006).

Due to such disadvantages, these types of sensors are viewed with prejudice. Non-destructive sensors, as the name suggests, include sensors that can be placed on the roadsides or on the top of the roads without intervening on the highway. These: Magnetic sensors, Wi-Fi sensors (Goodall 2017), Bluetooth sensors (Margreiter 2016), VIP (video image processing), radar (Zhao and Su 2017), LiDAR and ultrasonic detectors, etc., are sensors.

Among non-destructive sensors, LiDAR sensors are used for detection and ranging with light. These sensors are frequently used in autonomous vehicles in transportation planning (Ibisch et al. 2013, Yue et al. 2018) as well as in the detection of vehicles and pedestrians at intersections. Different solution algorithms are presented to observe and follow the situations of vehicles and pedestrians at the intersection with the LiDAR sensor. Background filtering, object clustering, object tracking, passenger and vehicle classification were performed with the 3D LiDAR sensor. As a result, the speed, position, presence, direction of pedestrians and vehicles could be determined.

In the 3D LiDAR study carried out to detect deer that can prevent vehicle passages on the highways and suddenly leave, the point cluster of the target object was created, the background filter and classification were made (Chen et al. 2019). Vehicle detection with sensors becomes difficult in rainy, windy and snowy weather conditions. Background filtering and point clustering operations were carried out in a presented algorithm for clearer and clearer detection of vehicles in these harsh weather conditions. Vehicle detections can be detected up to 22 m range and detection becomes more difficult at longer ranges.

LiDAR sensors are also used for vehicle queue detection at intersections. There have been applications trying to determine the ideal traffic signal time that requires queue length detection (Ban et al. 2011, Cildir et al. 2022). A study used the shockwave theory to estimate the queue length with high resolution traffic signal data (Liu et al. 2009). In another study carried out with a 3D LiDAR sensor, vehicles at the intersection could be followed by performing background filtering, point clustering, object classification, and lane detection. In the algorithm of determining the vehicle queue length forming at the intersection, the vehicles approaching the intersection are considered to have stopped after a certain deceleration and the length of the vehicles at the intersection can be calculated (Wu et al. 2020).

Non-destructive sensors are preferred because of their advantages such as being able to be installed without interfering with the flowing traffic and without destroying the road. In this study, a non-destructive LiDAR sensor has been preferred due to its unidimensionality and direct distance output. With the algorithm created for the unidimensional LiDAR sensor, the speeds and classes of the passing vehicles have been tried to be determined. At the same time, with this algorithm, the scenario of vehicle queues that may occur at the intersection has been created and the number of parked vehicles and the queue length they formed have been determined. The LiDAR sensor system created, respectively, in the presented algorithm, the materials used in this system, the measurements performed, the measurement evaluations and the results will be mentioned.

2. Materials and Methods

The materials used in the designed LiDAR system and the algorithm created are examined in two sub-titles.

2.1. The Design LiDAR System

In this study, unidimensional a LiDAR sensor system is shown in Figure 1. In this system, there is a 2-axis pan tilt kit, set on wood, with two servo motors and a unidimensional LiDAR distance sensor set on it as well. Servo motors are supplied from mains voltage with a 6V DC adaptor. There is also an Arduino Mega hardware board both managing servo motors, LiDAR sensor and performing calculation operations. The connection of the pan tilt of the Arduino and LiDAR sensor has been implemented with the connections on the board in Figure 1 below.

Benewake TF03 is a unidimensional long-distance sensor that is being mostly used in smart transportation systems,

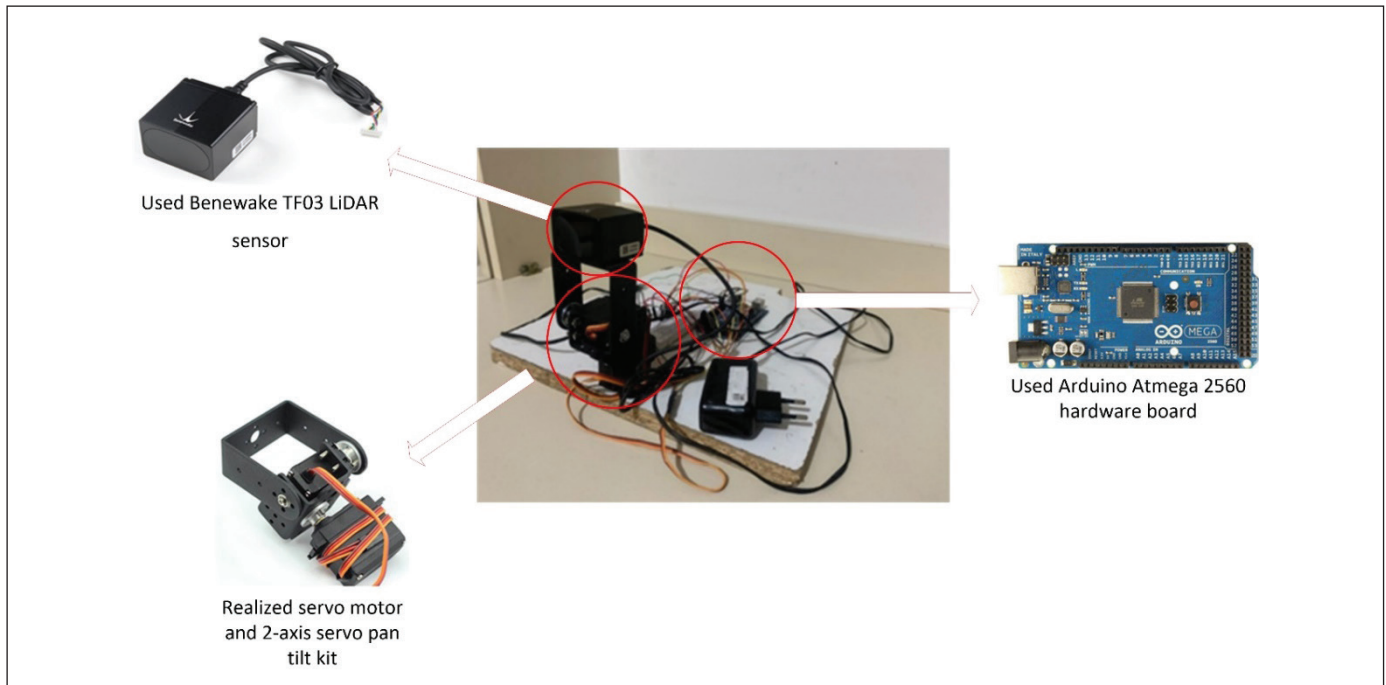


Figure 1. The setup LiDAR sensor system.

automotive sectors, and UAVs (unmanned aerial vehicles). And, also, it is a distance sensor that enables high frequency measurement up to 10 kHz, IP67 high enduring case, and some different communication interfaces in order to be used in different sections. The one with a 180 m distance range of this sensor has been preferred in this study. Even though it has a different structure from other 2D and 3D lasers due to its way of working, it is taken into account in LiDAR category as its laser light, 905 nm wavelength, falls under the category of laser light spectrum (Skoog 1981). Light Emitted Diode (LED) is used as a source of laser light (Sparkfun 2005).

16-input Arduino Atmega 2660 hardware board has been preferred as a programmer and controller in LiDAR sensor system. Arduino is a board that can be programmed with sub-software of C language. Its use is widespread as having a lot of libraries of sensors in it. This board has been used in this study as it has already-prepared libraries. The hardware board has been also used because it has much more out-port than any other Arduino group. Instead of Arduino hardware board used in this study, some different hardware boards may be used whenever is needed.

MG-996R is a servo motor that can reach up to 13 kg torque at 6V and has a capacity of 120 degree-rotation has been used in this LiDAR system. This motor can rotate by the command that is given and can take 60 degrees in 0.15

seconds. It basically consists of a gear mechanism with a DC engine, engine drive card, and potentiometer. The motor drive card has been checked by Arduino. Feeding of these motors has been brought about with a 6V-adaptor from mains voltage.

One 2-axis pan tilt kit has been used to obtain the 3D LiDAR sensor. This LiDAR sensor which is called unidimensional has been aimed to be gained two more dimensions with this pan tilt kit and so a sensor has been obtained like a three-dimensional one used in sectors. At the same time, with this pan tilt can be detected the angle of the target object.

2.2. The formed Finite-State Machine Algorithm

The system algorithm has been made up in the form of a finite state machine, which is a behavior model that is frequently used in embedded systems and shows machine states. It is frequently preferred in numerical systems because it is easier to make changes to it and to improve the algorithm (Choudhary 2018). A finite state machine contains five (tuples) $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$. 'Q' refers to finite states (Festag et al. 2008). ' Σ ' can be defined as the set of input symbols. ' δ ' is the finite transition function. ' q_0 ' represents the starting state. 'F' represents the finished state set (Xu et al. 2009). The finite states of 'Q' will be focused on in this study. The implemented finite state machine consists of four states. Respectively, there is no vehicle, the vehicle entered,

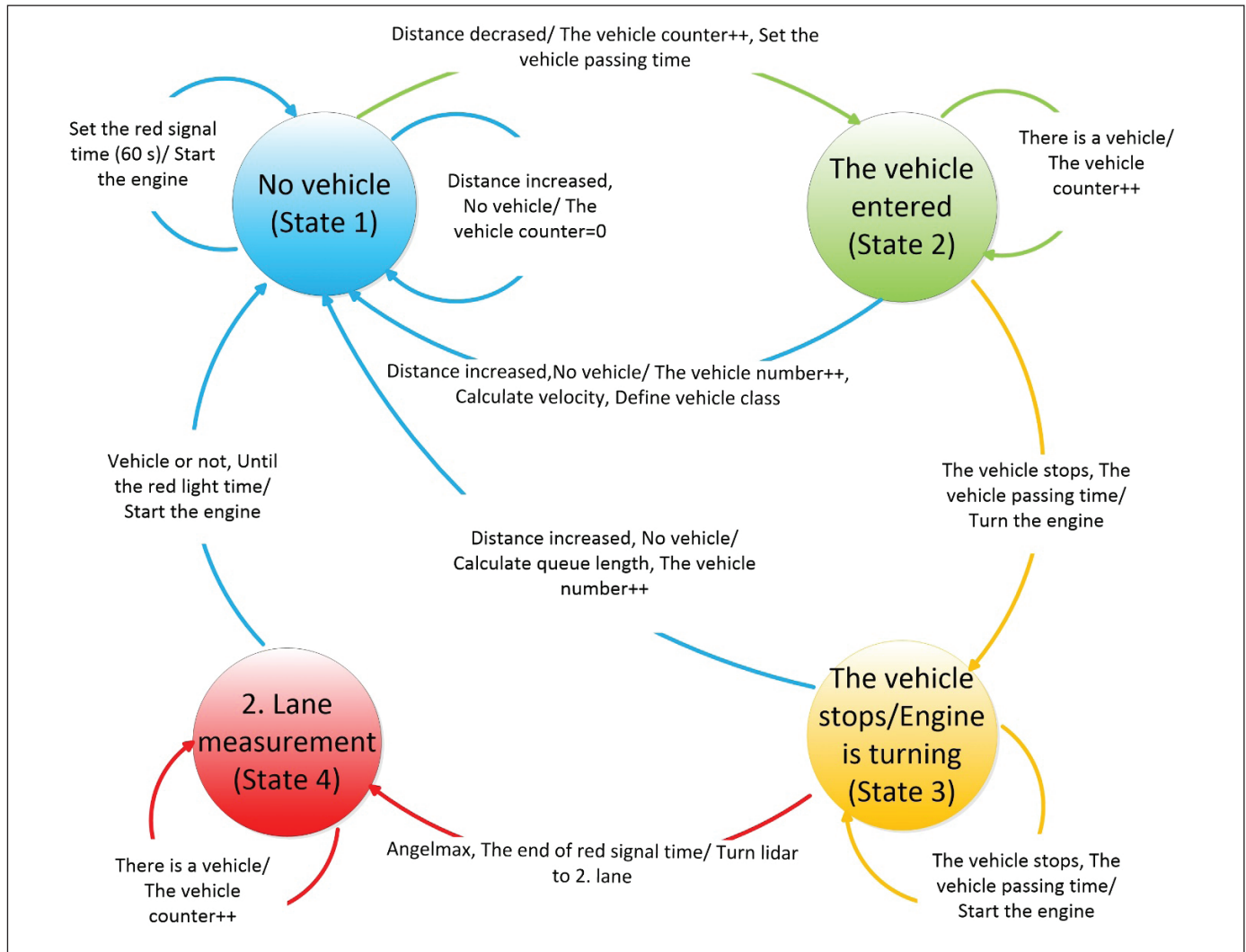


Figure 2. The formed finite-state machine diagram.

the vehicle stops/the motor rotates, and the 2nd lane measurement states. The state diagram created for the algorithm in this study is shown in Figure 2.

State 1 is no vehicle state. Considering the situation that this study will be carried out in real-time, a red light time of 60s has been established in this state. The algorithm completes four steps in 60 seconds. In state 1, when the vehicle enters in front of LiDAR sensor, the reference distance decreases, and the 2nd state is entered.

With the number of data obtained while the vehicle passes in front of the sensor, it is calculated how many seconds the vehicle passes in front of the sensor. Here, the pulse frequency of LiDAR sensor is 100 Hz, and the vehicle distance data obtained is calculated according to this frequency. This calculation formula is given in 1. Other formulas used in velocity calculation are given in 2 and 3, respectively.

$$t = \frac{nod}{f} \quad (1)$$

't' is second, a nod is the number of data obtained when the vehicle passes in front of LiDAR sensor and f is the frequency of LiDAR sensor.

The passing time of the vehicle in front of LiDAR sensor has been calculated with the formula 1.

$$X = V \times t \quad (2)$$

In calculating the speed of the vehicles, the average vehicle length (X) has been accepted as 3m. V is velocity.

In formula 2, the general road velocity formula is given. Based on formulas 1 and 2, the third formula has been formed and the vehicle speed has been calculated with this formula.

$$V = \frac{X \times f}{veri} \quad (3)$$

If the reference distance increases again after decreasing, it is understood that the vehicle has completely passed in front of the sensor and it returns to the 1st state. This situation is repeated every time a vehicle enters in front of the sensor for 60 seconds.

The situation in which the vehicle entering in front of LiDAR sensor is detected is the 2nd Situation. If the vehicle passes in front of the sensor without waiting, the number of passing vehicles increases by one and returns to the 1st state.

In this working algorithm, which is similar to the studies (Cai et al. 2010, Wu et al. 2013) that vehicles under a certain speed start to form a queue, it is passed to the 3rd State in the state machine when the vehicle waits for 5 seconds or more in front of the sensor.

State 3 indicates that queue formation has started. In this state, using the engine, the sensor scans from the beginning to the end of the vehicle waiting in the queue and calculates the queue distance. The same process is repeated for each queued vehicle and thus the total queue length is found. It takes 45 seconds from the start of the algorithm to the end of this state. At the end of 45 seconds, the 4th state is entered.

In the first three situations, the measurements of the vehicles in the 1st lane have been carried out. In Situation 4, it is determined whether there is a vehicle queue in the 2nd lane. In this situation, LiDAR sensor moves to the line of the 2nd lane from the point where the 1st lane finishes the tail

measurement. LiDAR sensor looks at the tail end of the 2nd lane for 15 seconds and at the end of 15 seconds, it decides whether the queue length of the 2nd lane and 1st lane is equal. In this decision phase, as in lane 1, the empty ground is taken as a reference.

After the 2nd lane control for 15 seconds, the first cycle of the algorithm is completed and it is started again. Thus, it is possible to calculate how many cars queue at the red light and the resulting queue length during the red light. A unidimensional LiDAR sensor with a 2-axis pan tilt can observe horizontally and vertically like a 3D LiDAR sensor by controlling both the 1st and 2nd lane.

3. Measurements and Evaluations

LiDAR sensor measurement spot positioning and working format considered for a leg of a four-leg intersection are shown in Figure 3. This LiDAR system has been thought to place in the line of the estimated queue that may occur during the red light on one leg. Firstly, LiDAR sensor, which looks at 90 degrees angle perpendicularly to the road, will start to move with the queue formation in this leg and follow the queue to be formed. Roadside placement (Zhao et al. 2019, Wu et al. 2020) and lest there is human interference in the system, It has been thought to place 5 meters above the ground, which is similar to the suggestion of setting over 2 or 3 meters above the ground and set over the road being capable of overlooking the middle of the 1st line. The distance of LiDAR sensor to the intersection can be changed according to the density of the road. Since the distance detection of LiDAR sensor is 180 m, the angle made

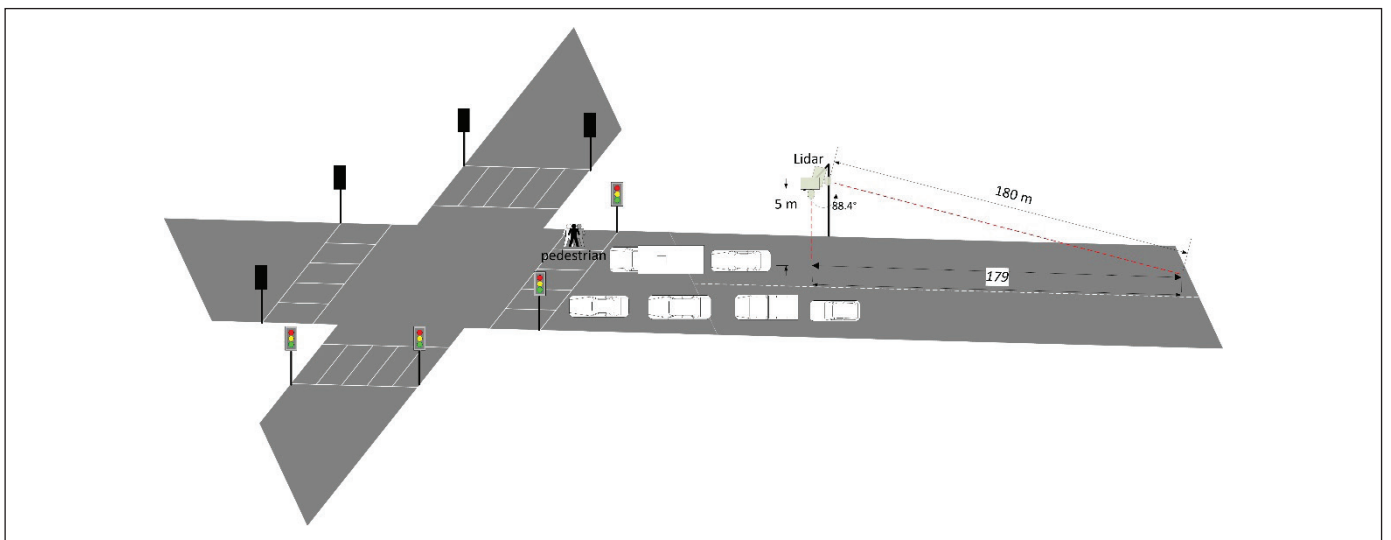


Figure 3. The suggested LiDAR system location and its working order.

with the servo motors will be approximately 89 degrees, and this will be able to detect the queue formation at a horizontal distance of 179 m from LiDAR sensor. Depending on the height of the place where the sensor is located, the queue length detection distance will also change.

Although the place considered for LiDAR sensor measurement is as in Figure 3, different methods have been applied because it is not possible to place the system in such a location. To provide the intersection environment in Figure 3, the measurements have been carried out in three different regions under two headings. In the first of the dynamic traffic measurements, the system has been placed over a pedestrian overpass, as in Figure 3, and real-time measurements have been taken for vehicle counting, speed measurement, and vehicle type detection. Due to the distance of the pedestrian overpass to the intersection, the queue has not been here and the queue length determination has not been performed in this environment. In the second dynamic measurement environment, although the speed of the vehicles over the pedestrian overpass has been detected in real-time, another controlled environment has been created to ensure that the vehicle speed detection of LiDAR system gave accurate results, where speed detection and vehicle count measurements have been repeated. The measurements and the places where the measurements have been taken will be given respectively.

The third measurement site has been performed by creating a controlled environment for the queue length determination under the static traffic sub-title. Thus, all the possibili-

ties expected from the dynamic and static intersection have been realized. These measurements and their evaluations will be given respectively.

3.1. Dynamic Traffic Measurements and Evaluations

Dynamic traffic measurements have been carried out in two different environments. In the first measurement area: The number, velocity, and classification of vehicles have been determined in real-time dynamic traffic. In these environments, vehicles are examined in terms of their number, speed, and classification in real-time dynamic traffic. While determining the vehicle class, vehicles are divided into two classes. Large vehicles are classified as heavy ones and automobiles as light ones. All types of automobiles are considered light vehicles and some of these vehicles are shown in

Large vehicles such as trucks, semi-trailer trucks, and buses are included in the heavy vehicle class. These vehicle models are shown in Figure 4b.

The ground clearance of the vehicles has been used to categorize the vehicles as light and heavy. For this reason, most vehicles with height roofs taller than automobiles can be included in the heavy one class.

In the second environment, a more controlled dynamic environment is preferred for vehicle counting and speed detection. Thus, the speed and number of vehicles with known speeds and numbers have been tried to be determined.

3.1.1. Real-time dynamic traffic measurements

In Figure 5, the first of these regions, the image of the pe-

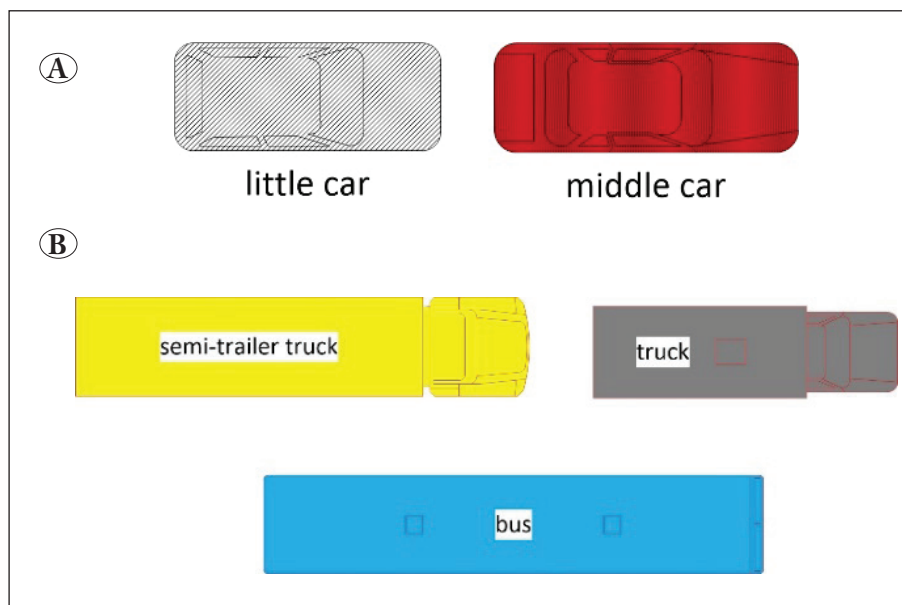


Figure 4. A) Light vehicle class images. B) Heavy vehicle class images

pedestrian overpass and LiDAR system, which is measured for vehicle counting, vehicle class, and vehicle speed determinations, is given together. Measurements have been taken at the pedestrian overpass, which is approximately 8 m high from the ground. As seen in the picture, the road consists of two vehicle lanes and an emergency vehicle passing lane. Vehicles have not used the emergency lane at the time of measurement.

The images, given in Figure 5, obtained from the system placed in real-time are shown instantaneously with the

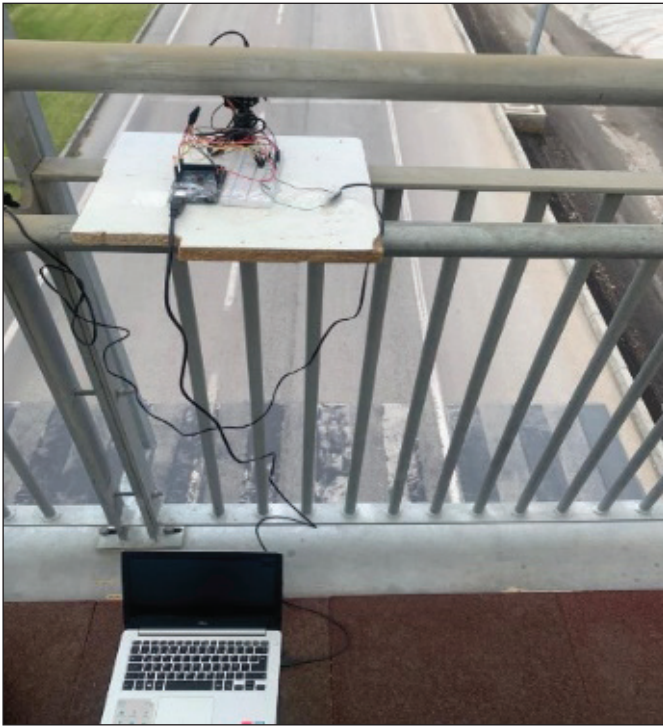


Figure 5. LiDAR system placed on pedestrian overpass and measurement site.

computer screen image in Figure 6. In this way, there are respectively 4 different images taken with the camera. So, the results can be instantly followed through the computer screen. The values of these measurements are summarized in Table 1.

In Table 1, the number, velocity, and class of the detected vehicles are given together. As seen in Figure 6, a heavy vehicle passes in front of the sensor in the first situation, and a light vehicle in other situations, and as can be seen in Table 1, these have been detected correctly. Each vehicle has been counted one by one with a LiDAR sensor, and the number of vehicles reached four after a total of four vehicles passed. At the same time, the speeds determined for each vehicle are transferred to Table 1 from the computer screen.

Table 1. Real-time dynamic traffic measurement results.

Situation/ Image	The counted total vehicles	Velocity (km/h)	Vehicle class
1	1	25.71	Heavy vehicle
2	2	45.50	Light vehicle
3	3	51.43	Light vehicle
4	4	42.20	Light vehicle

3.1.2. The controlled region dynamic traffic measurements

Controlled second region measurement moment images are given in Figure 4. Although vehicle speed detection and vehicle counting have been performed in the previous study, it has been repeated in this region because the vehicle speed has more controlled and measurable. At the same time, unlike the previous working environment, LiDAR sensor is placed in such a way that it can see the vehicles from the



Figure 6. Real-Time dynamic traffic measurements.

side. In this study, which has been carried out with a single vehicle, the vehicles have been counted by LiDAR sensor and their speeds have been determined by moving the vehicle forward and backward.

The measurement location and vehicle are shown in Figure 7. As it can be understood from Figure 7, this vehicle will not be able to speed more than 10 km/h due to the small movement area of the vehicle.



Figure 7. Measurement region.

Vehicle counting, speed detection, and computer output screens have been instantaneously recorded in the measurement area with a camera. Measurement images are given in Figure 8. In this way, the results have been followed in real-time on the computer screen. Four different images are given together in Figure 8. Since the measurements were performed after it rained, the puddle seen in the pictures

because of rain and has not affected the measurement conditions. In the first of these images, the vehicle is seen in a small way. In the other three pictures, the vehicles are not fully visible due to the desire to take the entire measuring setup with the camera. But in each picture, there is a vehicle and it is moving in the specified direction.

Since it is difficult to observe the results of these measurements on the computer screen in Figure 8, the values are summarized in Table 2. In each image/situation, the vehicle passed in front of the sensor once in the showed direction and its speed has been transferred to Table 2. The actual speed of the vehicle has been also included in Table 2 so that it can be compared with the measured vehicle speed. In each situation, vehicles have been counted with the detection of vehicle speeds together. The number of vehicles after each vehicle pass has been given in Table 2.

Table 2. The results of the controlled region dynamic traffic measurements

Situation/ image	The counted total vehicles	Velocity (km/h)	The real velocity (km/h)
1	1	10.09	10
2	2	8.57	9
3	3	9.64	9.5
4	4	7.46	8

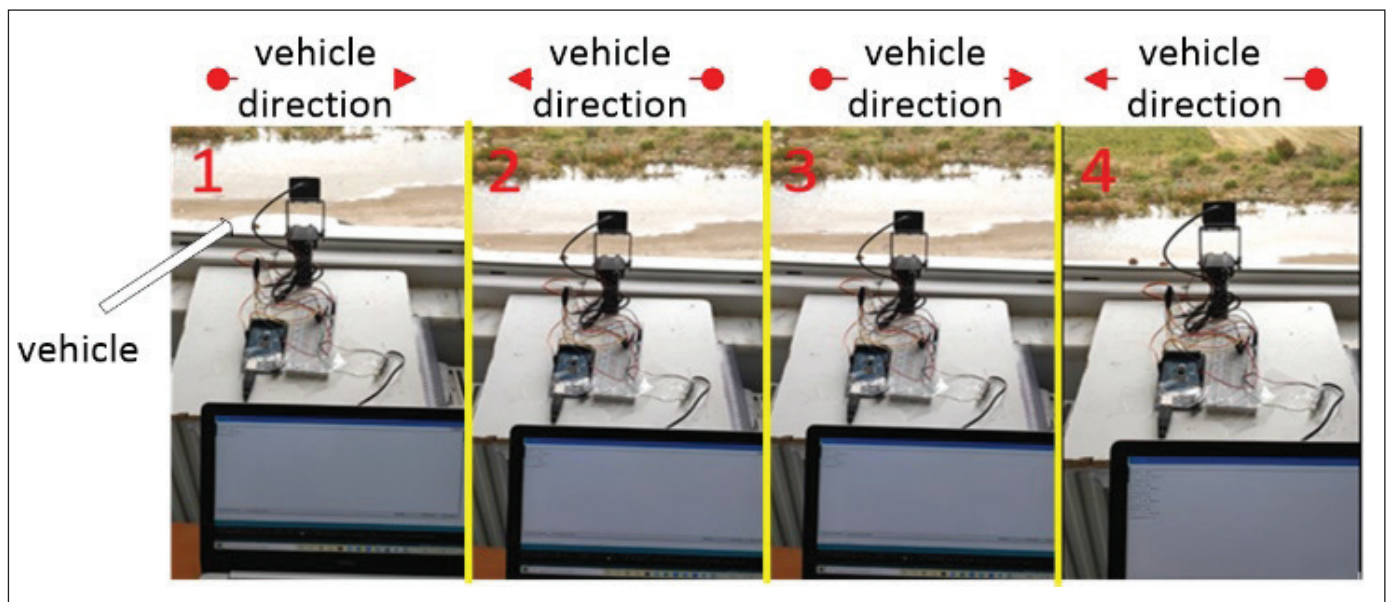


Figure 8. The controlled region dynamic traffic measurements.

3.2. Static Traffic Measurements and Evaluations

Figure 9 contains a virtual demonstration of how the queue length measurement is made. Since the queue length detection cannot be tested in a controlled manner at a real intersection, this part has been performed in a controlled parking lot. LiDAR sensor placed in the window on the 2nd floor of the building, being almost as highly equal as to the traffic light looks at directly the controlled parking lot and measurements have been conducted there. Upon seeing in the figure the height of the vehicle is considered fixed 3 meters). As tried to be shown in the figure, if the vehicle waits more than 5 seconds while passing in front of the sensor (it is considered stopped in the queue), the servo motor moves until it can see the empty road and stop when it sees the empty road. If two vehicles approach the sensor with an interval of more than one second, the sensor sees both vehicles separately and can detect the total queue length. The servo motor has an algorithm for angle calculation. By making use of this angle and the distance detection of LiDAR sensor, the horizontal tail length calculations of the vehicles standing throughout the road are shown in the figure. 'd' is the distance measured by LiDAR and 'l' is the tail length determined using the distance and tangent angle formula. LiDAR sensor system, which had to be positioned slightly different from the actual thought of set to the intersection tried to detect the vehicles from a certain distance. For this reason, calculations have been made by including the gap before every vehicle in the queue length.

As can be seen in Figure 10, four different pictures are given together. The first image is of the non-vehicle reference environment. The other environments are one vehicle queue, two vehicle queue, and two vehicle side by side, respectively. While performing the measurements in the 2nd, 3rd and 4th images of this Figure 10, the reference environment in the 1st image has been taken as a basis. In the 2nd and 3rd pictures, it has been desired to determine how much of a queue the vehicles formed. In the 4th picture, an environment has been created for the two vehicles to be in two different lanes. The measurements have been performed by considering that the vehicles in these two different lanes are the vehicles at the end of the queue.

Table 2 below represents the images/situations in Figure 10. If this table is examined, firstly the sensor measures the reference region at a distance of 9 m in the 1st image. Then, approximately 13 m queue length has been determined with one vehicle queue respectively in state 2. Approximately 15.5 m queue length has been detected in the 3rd situation with dual vehicles. At the same time, the actual queue lengths for each situation are given in this table. With the acceptance of the length of the vehicles, which had been accepted 3 m, it is seen that accurate results are obtained with small differences in the incorporated measurement.

In the 2nd and 3rd situations, when there is no vehicle in the 2nd lane, the queue length of the 2nd lane is not equal to the 1st lane info is received. In situation 4, it has been only tried to detect whether the 2nd lane control would take

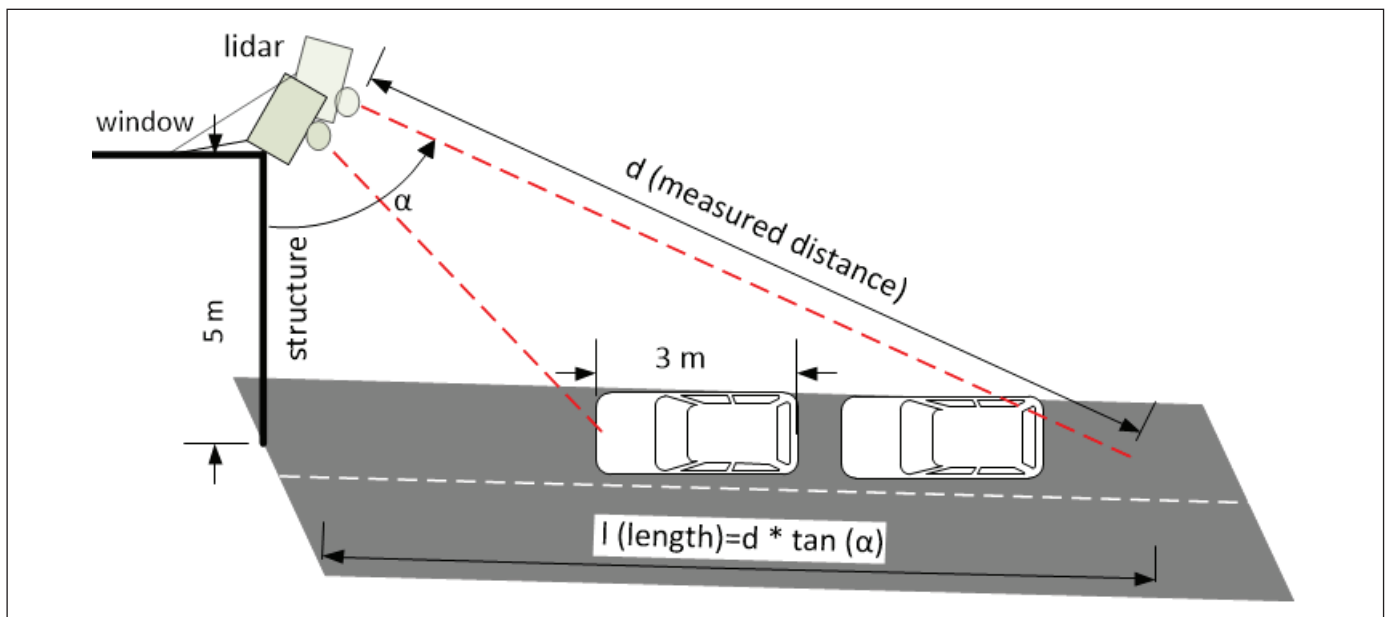


Figure 9. Queue length detection measurement working order.

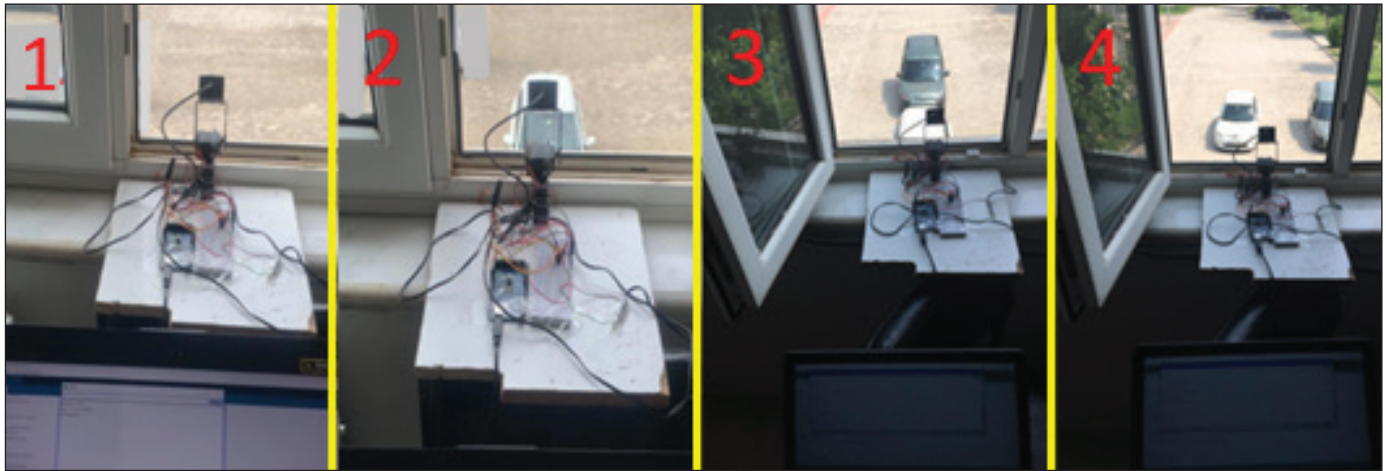


Figure 10. Static traffic queue length measurements.

Table 3. Static traffic queue length measurement results.

Situation/Image	Real Queue Length (m)	Measured Queue Length (m)	2. Lane Measurement
1 (no vehicle)	9	9	-
2	12	13	Not equal to 1. lane
3	15	15.5	Not equal to 1. lane
4	-	-	Equal to 1. lane

place. In this situation, as it should be, the output of the equability of the 2nd lane queue length to the 1st lane has been obtained and transferred to Table 3.

4. Discussions

In Table 4, comparisons of this study and some literature studies are given. As seen in this table, vehicle, speed, vehicle classification, queue length detections and distance and price comparisons are given together.

In this table, it has been paid attention to choose studies with LiDAR sensors from the methods used for vehicle detection. The study has been also placed in this table and compared with other similar studies.

When the study performed is compared with the other studies in Table 4, it appears to be similar to the study of the 6th article in terms of vehicle classification, queue length detection, velocity detection, and vehicle counting. Along with different methods carried out by this article in the study, it is also much superior in terms of cost. In article 6th, a 3D LiDAR sensor was used for queue length detection. While this 3D LiDAR sensor detects the queue, it accepts the vehicles under a certain velocity as stopped and as the queue end, and with this sensor clear queue length detections will

not be possible with this sensor in long queues that may occur due to vehicles approaching behind the stationary ones. The implemented system, on the other hand, works fluently not only in moving traffic, but also in stationary traffic with servo motors, it can follow the stationary vehicle queue and gives clearer results in terms of queue length and distance instead of estimated values.

If it is paid attention to the study in article 9th, infrared sensor and camera were used together to detect the queue length. Vehicle number, classification, velocity detection, queue tracking, and queue length detection could not be made with a single point sensor.

Although there is only one unidimensional LiDAR sensor, it makes up for the lack of literature in that it can detect the number, speed, and type of vehicles in a single lane and the length of the queues of vehicles in two lanes. Since this sensor system contains a point sensor, it also precedes the systems with 2D and 3D LiDAR sensors in terms of cost. With this simple structured system, a different and new contribution has been made to the literature in terms of algorithm and performance. In the performed measurement environments, the success rates for dynamic intersection are 96.36%; for stopping traffic queue length determination, it is 96.35%.

Table 4. Literature comparisons.

Study	Detector	Method	Classification	Distance (m)	Queue Detection	Velocity	Vehicle Counting	Cost
1. Current Study	LiDAR	Unidimensional laser	+	180	+	+	+	lowest
2. (Zhao et al. 2019)	LiDAR	3D laser	+	80	-	+	-	high
3. (Emami et al. 2019)	-	Algorithm	-	-	+	-	-	~
4. (Lee and Coifman 2015)	2× LiDAR+ Camera	2D laser	+	80	-	+	+	highest
5. (Cai et al. 2010)	Camera	Image processing	-	~	+	-	-	~
6. (Wu et al. 2020)	LiDAR	3D Laser	+	80	+	+	+	highest
7. (Cheung et al. 2005)	Magnetic	Electromagnetic	+	10	-	+	+	low
8. (Tiaprasert et al. 2015)	-	Mathematics	-	-	-	-	-	-
9. (Rani et al. 2017)	LiDAR+ Camera	Infrared+ Image Processing	+	-	+	-	-	low
10. (Managuli et al. 2017)	LiDAR	Infrared	+	-	-	-	-	~
11. (Sen et al. 2012)	Camera	Image Processing	-	100	+	+	+	low

In the studies performed in controlled environments, it has not had possible to measure with more vehicles, since we only have had two vehicles. Although there are a small number of vehicles, measurements have been made considering all conditions. This system has been designed in conditions that can measure different vehicle numbers with LiDAR sensor range. Since the presented study includes all the conditions of a real-time intersection, it will be able to work at an intersection easily.

In future studies, queue length measurements can be taken for distances longer than 20 m by placing LiDAR sensor system at higher places and with more vehicles. Although LiDAR sensor used has 180 m distance measurement capability, it should be taken into account that the longer the measured distance increases, the quality of its resolution decreases, and losses due to reflection increase. In addition, On condition that there is an area to be placed above the road in the next studies, the queue length can be determined without creating a controlled environment. The study performed can be supported by a second LiDAR system for roads with

more than two lanes or for determining the number, velocity, types of vehicles on each lane, and also different studies can be carried out. While LiDAR sensor system used is not affected by darkness due to the characteristics of LiDAR distance sensor, it can be affected by excessive sunlight, heavy rain, and reflection from the snow. Even if the study was carried out in some adverse weather conditions, it will be a new study to test its performance in harsh weather conditions (heavy rain, snow, hail) and to measure its performance under these circumstances. At the same time, this algorithm and the established system are open to new study subjects with different LiDAR sensors.

5. Conclusion

This article presents a new algorithm for intersection density detection with a unidimensional LiDAR sensor that can be placed above the road. In contrast to the 2D or 3D LiDAR sensors used in studies in the literature, a point-angle, and unidimensional LiDAR sensor has been used in this study. In this study, a single angle LiDAR sensor with 2

servo motors and a 2-axis pan tilt kit has been turned into a 3D dimensional one. Real-time measurements have been taken from LiDAR sensor mounted on a pan tilt that can be moved with two servo motors.

This study has been performed in three different measurement environments. These measurement environments contain all the possibilities expected from an intersection. With LiDAR sensor system placed over the pedestrian overpass in the 1st environment, the speeds, numbers, and classes of vehicles randomly passing in front of the sensor in dynamic traffic have been determined. For these measurements performed in a dynamic environment to be more comparable, a different environment has been needed. Therefore, in the second measurement, speed and number determinations have been made with a single vehicle in a controlled environment. In the third measurement, the environment of the vehicles approaching the intersection and forming a queue at the red light has been prepared in a controlled environment. In this measurement environment, which has been performed with two vehicles, the lengths of two vehicles in the queue have been detected for two lanes separately.

6. References

- Akanbi, L., Olajubu, E.A. 2012.** A fuzzy-based intelligent traffic control system for managing VIP-induced chaos at road intersections. *African Journal of Computing ICT* 5: 109-119.
- Ban, X. J., Hao, P., Sun, Z. 2011.** Real time queue length estimation for signalized intersections using travel times from mobile sensors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19: 1133-1156.
- Cai, Y., Zhang, W., Wang H. 2010.** Measurement of vehicle queue length based on video processing in intelligent traffic signal control system. IEEE. 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 615-618, Changsha, China.
- Chen, J., Xu, H., Wu, J., Yue, R., Yuan, C., Wang, L. 2019.** Deer crossing road detection with roadside LiDAR sensor. *IEEE Access* 7: 65944-65954.
- Cheung, S. Y., Coleri, S., Dundar, B., Ganesh, S., Tan, C.-W., Varaiya P. 2005.** Traffic measurement and vehicle classification with single magnetic sensor. *Transportation research record* 1917: 173-181.
- Cheung, S. Y., Varaiya, P. 2006.** Traffic surveillance by wireless sensor networks. California Path Program Institute Of Transportation Studies University Of California, Berkeley, Institute Of Transportation Studies University Of California: 13.
- Chiu, S., Chand, S. 1993.** Adaptive traffic signal control using fuzzy logic. IEEE. Fuzzy Systems, 1993., Second IEEE International Conference on, 1371-1376.
- Choudhary, P. 2018.** Analyzing virtual traffic light using state machine in vehicular ad hoc network. Next-generation networks, Springer. Delhi, India, 239-245.
- Cildir, A., Kahrıman, M., Tıgdemir, M. 2022.** The Intersection Vehicle Delay Optimization For Ideal Traffic Light Cycle Time. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* 6: 126-136.
- Emami, A., Sarvi, M., Bagloee, S. A. 2019.** A neural network algorithm for queue length estimation based on the concept of k-leader connected vehicles. *Journal of Modern Transportation* 27: 341-354.
- Festag, A., Noecker, G., Strassberger, M., Lübke, A., Bochow, B., Torrent-Moreno, M., Schnauffer S., Eigner, R., Cattrinescu, C., Kunisch, J. 2008.** "NoW - Network on Wheels" : Project Objectives, Technology and Achievements. CiteSeer^x. Proceedings of 5rd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT), 211-216, Hamburg, Germany.
- Goodall, N. J. 2017.** Fundamental characteristics of Wi-Fi and wireless local area network re-identification for transportation. *IET Intelligent Transport Systems* 11: 128-135.
- Ibisch, A., Stümper, S., Altinger, H., Neuhausen, M., Tschentscher, M., Schlipfing, M., Salinen, J., Knoll, A. 2013.** Towards autonomous driving in a parking garage: Vehicle localization and tracking using environment-embedded lidar sensors. IEEE. 2013 IEEE intelligent vehicles symposium (IV), 829-834.
- Lee, H., Coifman, B. 2015.** Using LIDAR to validate the performance of vehicle classification stations. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 19: 355-369.
- Liu, H. X., Wu, X., Ma, W., Hu, H. 2009.** Real-time queue length estimation for congested signalized intersections. *Transportation research part C: emerging technologies* 17: 412-427.
- Managuli, M., Deshpande, A., Ayatti, S. H. 2017.** Emergent vehicle tracking system using IR sensor. IEEE. 2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT), 71-74, Mysuru, India.
- Margreiter, M. 2016.** Fast and Reliable Determination of the Traffic State Using Bluetooth Detection on German Freeways. *Transportation Research Procedia*. World Conference on Transport Research, Shanghai, China
- Rani, L. P. J., Kumar, M. K., Naresh, K., Vignesh, S. 2017.** Dynamic traffic management system using infrared (IR) and Internet of Things (IoT). IEEE. Third International Conference on Science Technology Engineering & Management (ICON-STEM), 353-357, Chennai, India.

- Sen, R., Maurya, A., Raman, B., Mehta, R., Kalyanaraman, R., Vankadhara, N., Roy, S., Sharma, P. 2012.** Kyun queue: a sensor network system to monitor road traffic queues. ACM. Proceedings of the 10th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, 127-140, India.
- Skoog, W. (1981).** "Principles Industrial and Analysis." 2. Ed.
- Sparkfun. (2005).** "TF03-180 LiDAR(Long-range distance sensor)." from en.benewake.com.
- Tiapraser, K., Zhang, Y., Wang, X. B., Zeng, X. 2015.** Queue length estimation using connected vehicle technology for adaptive signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16: 2129-2140.
- Wu, A., Qi, L., Yang, X. 2013.** Mechanism analysis and optimization of signalized intersection coordinated control under oversaturated status. 13th COTA International Conference of Transportation Professionals. Shanghai, China. 96: 1433-1442.
- Wu, J., Xu, H., Zhang, Y., Tian, Y., Song, X. 2020.** Real-time queue length detection with roadside LiDAR data. *Sensors* 20: 2342.
- Xu, B., Chen, M., Xing, C., Zhang, G. 2009.** A network traffic identification method based on finite state machine. IEEE. 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 1-4, Beijing, China.
- Yue, X., Wu, B., Seshia, S. A., Keutzer, K., Sangiovanni-Vincentelli, A. L. 2018.** A lidar point cloud generator: from a virtual world to autonomous driving. Proceedings of the 2018 ACM on International Conference on Multimedia Retrieval, 458-464, Yokohama, Japan.
- Zhao, J., Xu, H., Liu, H., Wu, J., Zheng, Y., Wu, D. 2019.** Detection and tracking of pedestrians and vehicles using roadside LiDAR sensors. *Transportation research part C: emerging technologies* 100: 68-87.
- Zhao, Y., Su, Y. 2017.** Vehicles detection in complex urban scenes using Gaussian mixture model with FMCW radar. *IEEE Sensors Journal* 17: 5948-5953.



Radye Plak Rijitliğinin Düşey Eksenel Yüklü Kazık Grubu Davranışına Etkisi

Role of Slab Rigidity on the Behavior of Axially Loaded Pile Group

Zehra Nil Kutlu , İsmail Emrah Kılıç* , Mert Tolon 

Maltepe Üniversitesi, Maltepe Eğitim Köyü Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul

Öz

Kazıklı temellerin yapısal modellenme çeşitliliklerini temel alan bu çalışma kapsamında farklı kazık-zemin etkileşim kriterlerini dikkate alan üç ayrı yaklaşım ele alınmıştır. Bunlar sırasıyla, i. basit model: ankastre mesnet modeli, ii. detaylı yapısal model: eş değer lineer yay kabulü, iii. detaylı yapısal model: non-lineer zemin yayları şeklindedir. İlk iki yaklaşım kazıkların ön boyutlandırması için kullanılmış ve tek radye kalınlığı için hesaplanmıştır. Son model yaklaşımında ise farklı radye kalınlıkları için model tekrarlı şekilde çözülmüş ve kazıklara aktarılan yük dağılımı, radye gerilme dağılımı ve oturma davranışı irdelenmiştir. Çalışma kapsamında, 26.0m x 50.0m boyutlarında radye temeli olan, yüksek bodrumlu, 7 katlı bir yapı kullanılmıştır. SAP 2000 programı kullanılarak yapılan yapısal modellerde zemin-yapı davranışı, yük-deformasyon ilişkileri şeklinde ilgili yaylar ile ifade edilip radye altında herhangi bir temel altı zemin direnci katkısı dikkate alınmamıştır. Bu şekilde radye ve kazıklar arasındaki gerçek yük-deformasyon ilişkisi non-lineer zemin yay tanımı ile farklı radye kalınlıkları için incelenmiştir. Çalışmada verimli bir tasarım için, derin temel elemanları olan kazıkların deformasyon karakteristiği ve nihayetinde kazıklar arası yük dağılımı çalışılmıştır. Çalışma sonucunda, eksenel yüklü kazıklı radye temellerin geoteknik tasarımında basitleştirilmiş ve detaylı yaklaşımların kullanımının güvenlik ve uygulanabilirlik açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Her iki yaklaşımın uyumlu sonuç verdiği ve basitleştirmenin de eksenel yükler altında tasarım için kabul edilebilir olduğu teyit edilmiştir. Bunun yanısıra ayrıca, üst yapı yüklerinin kazıklara efektif aktarılması için radyenin yeteri derecede rijit olması gerekliliği sonucuna varılmıştır. Çalışmada ele alınan modelde, radye kalınlığının en az 1m olması durumunda radye temel efektif olarak yük aktarmaya başlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin-yapı etkileşimi, Doğrusal olmayan zemin yayları, t-z eğrileri, Kazık-radye etkileşimi

Abstract


Within the scope of this study, which was based on the structural modelling variations of pile foundations, three different approaches for different pile-soil interaction criteria were discussed. These approaches were respectively, i. simple model: fixed supported model, ii. detailed structural model: equivalent linear spring model and iii. detailed structural model: non-linear spring model. The first two approaches were used for pre-dimensioning and were calculated for single raft thickness. In the third approach, the model was iteratively analyzed for different slab thicknesses and the load distribution transferred to piles, slab stress distribution and settlement behavior were examined. In this study a 26.0m x 50.0 m piled raft foundation of a 7 - story building was examined. In the structural models created using the SAP 2000 program, the soil-structure behavior was expressed with relevant springs, and any soil resistance contribution under the raft was not taken into account. Pile forces were obtained through definition of the actual load-deformation relationships of the raft and the piles via varying raft thickness and non-linear soil links. The deformation characteristics and load distribution among the piles were evaluated for an optimal design. Finally, conservative versus comprehensive approaches for design of a piled raft foundation under axial loading were discussed with respect to safety and feasibility where two approaches gave consistent results. It is also concluded that the raft must be sufficiently rigid to distribute the loads to the piles effectively. In this specific study, the raft functions effectively once the thickness reached 1m and above.

Keywords: Soil-structure interaction, Nonlinear soil links, t-z curves, Pile-raft interaction

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: emrahkilig@maltepe.edu.tr

Zehra Nil Kutlu  orcid.org/0000-0003-4813-588X

İsmail Emrah Kılıç  orcid.org/0000-0002-6514-2224

Mert Tolon  orcid.org/0000-0002-0131-2976



Bu eser "Creative Commons Atıf-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

1. Giriş

Zeminler, etkileşimde buldukları yapıya kıyasla, yapısal kuvvet dağılımının son halkası durumunda olduklarından, mühendislik davranışlarının doğru şekilde dikkate alınması, genel yapı tasarımının doğruluğu ve beklenen yapısal davranış sonuçlarının yakınsaklığı açısından kritik öneme sahiptir. Zeminlerin heterojen yapıya sahip olmaları, doğal malzeme olmaları ve kontrol dışı çok sayıda parametreye sahip malzemeler olmalarından dolayı, mekanik davranışları değişkenlik göstermektedir. Bu doğrultuda uygun bir yapısal mühendislik tasarımı ortaya koyabilmek için zeminin geoteknik davranışının titizlikle değerlendirilmesi, yapının genel emniyeti ve ekonomik tasarıma esas optimum çözümlerin elde edilebilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır.

Geoteknik temel mühendisliği tasarımlarında zemin parametrelerinin doğru tayin edilmesi, zemin malzeme modelinin zemin davranışı ve yükleme karakteristikleri nispetinde belirlenmesi, yapı-zemin etkileşimi açısından rijitlik değerlerinin doğru belirlenmesi ve tüm bunların olası değişimleri halinde nihai tasarımdaki etkilerinin bilinmesi gerekmektedir. Söz konusu çözümlerdeki karmaşıklığın ve modelleme zorlukları sebebi ile son yıllarda özellikle geoteknik alanına özel farklı zemin davranış modelleri sunan yazılımlarla, iki ve üç boyutlu doğrusal olmayan sürekli ortam analizleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, klasik mukavemet kuralları ve temel geoteknik bilgisine dayanarak oluşturulan konvansiyonel basitleştirilmiş yaklaşımların temel sistemlerinin ön boyutlandırmasındaki ve mertbe kontrolündeki yeri ve önemi gözardı edilemez. Karşılaştırmalı çözümler üzerinde yapılacak parametrik çalışmaların, farklı metodolojilere sahip yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmesi ve sonuçların sunulması, uygulanabilir, optimum tasarımlara ulaşabilmek bakımından pratik mühendislik çalışmalarında fayda sağlamaktadır.

Kazıklı radye temel sistemlerinde düşey yükler altında yük aktarımı ve oturma davranışı, kazıklar-zemin-radye arasındaki rijitlik-deformasyon bazlı etkileşime bağlıdır. Uygun yük dağılımı, izin verilebilir deformasyon ve yeterli temel kesitlerinin tayini ile en uygun çözüme karar verilmesinde, i. radye kalınlığı, ii. temel zemini yatak katsayısı, ve iii. kazık yük-deformasyon özellikleri gibi model bileşenleri yapının bütününe optimizasyonunda öneme sahiptir.

Temel sistemlerinin analizi için çoğunlukla, basitleştirilmiş analitik hesap yöntemlerinin yanısıra bilgisayar tabanlı nümerik hesap yöntemleri kullanılmaktadır (Poulos 2001). Özellikle sonlu elemanlar yöntemine dayalı analizler her

ne kadar zemin modellemesi için kullanılıyor olsalar da her temel sistem çözümünde zemin-temel etkileşiminin doğru bir şekilde modellenebilmesi halen bu çözümlerin en zor ve kritik aşamasını oluşturmaktadır. Bu noktada sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan temel sistemi tasarım çözümleri ciddi bilgi işlem gücü, zaman ve uzmanlık gerektirdiğinden, temel tasarımda pratik uygulamalarda tercih edilmeyip, genellikle akademik ve araştırma odaklı kalabilmektedir. Pratik analiz ve tasarım amaçlı olarak, hızlı, kolay ve uygulanabilir zemin-temel model yaklaşımlarının ortaya konması hızlıca oturma ve gerilmelerin belirlenmesini sağlayarak pratik boyutlandırmaya olanak sağlamaktadır.

Randolph (1994) tarafından kazıklı radye temel tasarımıyla ilgili tariflenen tasarım yaklaşımlarından biri olan konvansiyonel yaklaşım kazıkların üst yapıdan gelen yükü büyük ölçüde taşıması esasına dayanmaktadır. Liang vd. (2003) çalışmasında kazıklı radye temel sistemlerinde, tüm yükü taşımalarından ziyade kazıkların oturma kriterinin kontrolü için kullanıldığını belirtilmektedir. Nguyen vd. (2013)'e göre kazıklı radye temel sistemlerinin analizi için kullanılan basitleştirilmiş hesap yönteminde sadece kazıklar ve radye arasındaki etkileşim dikkate alınmakta olup kazıklar için grup kazık etkisi dikkate alınmamaktadır. Tan ve Chow (2004) çalışmalarında bu temel sistemlerinin tasarımında kazık ve radye temelinin beraber çalışması durumunu incelemiştir.

Bilgisayar tabanlı hesap yöntemlerinde daha kesin hesap yaklaşımları için sınırlı elemanlar yöntemi (BEM) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) veya bu yöntemlerin kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu yöntemle yapılan çalışmaların önemli bir örneğinde Reul ve Randolph (2003) aşırı konsolide kil bir zemin tabakasındaki kazıklı radye temel sisteminin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ederek zemin-yapı etkileşimi açısından temel sistemini incelemiştir. Sales vd. (2010) sınırlı elemanlar yöntemi ve sonlu elemanlar yönteminin kazıklar arasındaki etkileşimi analiz etme açısından farklılıklarını tespit etmişler, bunun oturmalar üzerindeki etkilerine değinmişlerdir ve temel sisteminin oturma performansının zemin-radye-kazık etkileşiminin toplam bir yansıması olduğu sonucuna varmışlardır.

Kazıklı radye temel sistemlerinin davranışlarını etkileyen faktörlerinin analizi için de literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bunlardan Long (2010) yaptığı büyük ölçekli arazi test modelinde kazık ve radye arasında yük dağılımı değişiminin oturma kriteri üzerindeki etkisini incelemiştir ve toplam yükün kazıklara gelen oranı arttıkça temeldeki oturma miktarının azaldığını gözlemlemiştir. Temel sisteminde kazıklar arasındaki yük dağılımının yük seviyelerine

göre farklılaşması bu dağılımdaki değişimin radye davranışı üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışma Lee vd. (2010) tarafından yapılmıştır. Cunha vd. (2001) kazıklı radye temel tasarım sistemlerini etkileyen faktörler hakkında yaptıkları nümerik çalışmanın bir sonucu da artan radye kalınlığı ile birlikte yük dağılımında radye tarafından alınan yük oranının arttığı ve temel sistemi için hem toplam hem de farklı oturumların azaldığı sonucuna varılmıştır.

Lin ve Feng (2006) radye kalınlığı ile radye boyutlarının temel sisteminin oturma kriteri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Oh vd. (2009) radye altındaki zemin tipinin temel olan etkisini incelemek amacıyla granüler ve kohezyonlu zemin tiplerinin kullanıldığı bir nümerik modelleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışma analiz sonuçlarında kohezyonlu zeminlerde temel oturma kriteri üzerinde radye kalınlığının etkili olduğu gözlemlenirken granüler zeminler için radye kalınlığının oturma kriteri için kayda değer bir etkisi gözlemlenmemiştir. Leung vd. (2010) çalışmalarında, radye kalınlığının artması ile kazıklı radye sisteminin kompozit bir sistem olarak hem temel genel rijitliğini artırabileceğini hem de üst yapının bozulmasına ve çatlamasına neden olabilecek farklı oturumları azaltabileceğini gözlemlemiştir.

Sinha vd. (2019) çalışmalarında yükleme şiddeti, zemin yatak katsayısı büyüklüğü (K_s) ve radye kalınlığı gibi parametrelerin esnek radye temel taban basıncı ve oturması üzerindeki etkisini sayısal modelleme çalışmaları ile anlamaya çalışmışlardır ve çalışma sonunda zemin yatak katsayısı parametresinin temel taban basıncı üzerindeki en etkin değişken olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Modak ve Singh (2022) makalelerinde, sert kil üzerindeki büyük çaplı kazıklı radyeler için sayısal olarak yürütülen bir parametrik çalışmayı sunmaktadırlar. Kazık sayısı, kazık uzunluğu, kazık aralığı ve radye kalınlığının etkileri, büyük çaplı kazıklı radyelerin farklı ve ortalama oturumları, radyenin eğilme momenti ve yük paylaşımı açısından değerlendirilmiştir (Modak ve Singh, 2022). Çalışmada radye kalınlığı için, radye yapısal rijitliğinin esnekten rijite doğru farklı özellikler gösterileceği şekilde farklı değerler kullanılmıştır. Radye kalınlığı artarak radye daha rijit bir yapı haline geldiğinde hem farklı oturma değerleri hem de ortalama oturma değerleri azalmış fakat kazıklarda daha büyük eğilme momentleri oluşmuştur. Kazıklı radye sistemlerin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bir nümerik analizinde yükleme koşulları, kazık boy ve çapları, zemin parametreleri sabit olarak bırakılmış sadece radye kalınlığı ve kazık aralıkları değişken olarak kullanılmıştır (Kalita vd. 2021). Çalışmada izin verilebilir temel oturma limitlerinin, kazık aralığından bağımsız olarak esnek/yarı-esnek davranış gösterebilen kalınlıklarda sağlandığı sonucuna varılmıştır. Mali (2019) üç boyutlu sonlu elemanlar metodu yardımı ile kazık aralığı ve radye kalınlığı değişkenlerinin, temel yapısına ait oturma, yük dağılımı, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri üzerindeki etkilerini farklı zemin tipleri için incelediği oldukça kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma sonunda tüm zemin tipleri için radye kalınlığının ortalama oturma değerlerini arttırdığını ve farklı oturma değerlerini düşürdüğü sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca düşük radye kalınlığı ve seyrek kazık aralığı durumunun eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerini düşürdüğü sonucuna varmıştır.

Öte yandan, kazıklı temel sistemlerinin modelleme yöntemlerine yönelik yapılan bir diğer değerlendirme çalışmasında (Sheil vd. 2019), kazık-zemin-radye etkileşiminde, toplam kazık grubu oturma değerinin (d_{toplam}) kazık çapı (D) ile normalize grup oturma değerine (S_{ng}) bağlı olarak; ($S_{ng} = d_{toplam} / D$); radye tarafından oluşması beklenen direnci üç ayrı şekilde değerlendirilmiştir. Buna göre, eğer, $0\% < S_{ng} < 1.5\%$ ise, radyenin yük almaya katkısı oldukça düşüktür ve bu nedenle genellikle radye etkisi ihmal edilir ve tüm direnç kazıklar tarafından alınacak şekilde tasarım yapılır. Eğer, $1.5\% < S_{ng} < 4\%$ ise, kazıklar nihai kapasitelerinin %90'ına kadar yük alırlar ve eğer, $S_{ng} > 4\%$ ise, ancak bu durumda kazıklı radyede ek direnç esas olarak radyeden sağlanmaya başlanır.

Mandolini ve Viggiani (1997) ve Kumar vd. (2016) çalışmalarında, kazıklı radye sistemi olarak tasarlanan radye temel maksimum katkısının izole bir radye direncine göre oldukça düşük olduğunu; ve ayrıca kazıkların sağladığı maksimum direncin, radyenin varlığından bağımsız olduğunu da raporlamışlardır (Comodromos ve Bareka, 2009). Bu nedenle, kazıkların etrafındaki zemin direncini tarif eden yay elemanları, radye altındaki dirençten bağımsız olarak düşünülerek ifade edilmelidir (Sheil vd. 2019). Saeed (2022) çalışmasında zeminin nonlinear davranışının radye temeller üzerindeki etkisini sonlu elemanlar metodu kullanarak incelemiştir. Bu çalışmada radye temel rijitlik değerinin temel aşı basıncı kuvvetleri, zımbalama kuvvetleri ve eğilme momentleri üzerindeki değişimi olmuştur. Çalışmada Winkler yay modelindeki süreksizlik dezavantajına rağmen nonlinear davranış temsil edebilme kabiliyeti bu metodun halen verimli bir yöntem olduğunu göstermiştir. Düşük rijitliğe sahip (esnek) radye sistemlerde zemin basıncı değerinin zemin taşıma gücünü geçebildiği ve anlamsız sonuçlar ortaya çıkabildiği de gözlemlenmiştir. Temel yapısının rijitlik değerini etkileyen

değişkenler radye kalınlığı, kolon aralıkları, beton elastisite modülü ve zemin yatak katsayısı olarak belirlenmiştir (Manjunath vd. 2018).

Literatürdeki araştırmalardan da görüldüğü gibi, kazıklı radye temellerde sistemin davranışı birçok faktöre göre şekillenmektedir. Tasarım ve davranışta etkili olan bu faktörler; kazık konfigürasyonu (kazık sayısı, kazıklar arası mesafe, kazıkların yerleşimi, boy dağılımları vs.), kazık özellikleri (kazık çapı, malzemesi, uzunluğu vs.), radye özellikleri (radye kalınlığı, boyutları ve geometrisi) ve zemin özellikleri (temel zemin sınıfı ve mukavemeti) olarak sayılabilir. Bu faktörlerin her biri davranışa etki ettiği gibi bu faktörlerin çeşitli kombinasyonları da davranışı ve sonuçları değiştirebilmektedir.

Bu doğrultuda çalışma kapsamında, diğer tüm faktörler sabit tutularak, radye kalınlığının kazıklara aktarılabilecek yüklemeye olan etkisi, temel rijitliğine bağlı yük dağılımının ne şekilde değişeceği farklı yaklaşımlarla ele alınarak geniş bir perspektiften değerlendirilmektedir.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Zemin Karakterizasyonu ve Yükler

Çalışmada, bodrum kat yüksekliği 4.0m, zemin ve diğer 5 adet normal katın yükseklikleri 3.0m olan toplam 7 katlı bir hastane yapısı ve bu yapıya ait temel sistem modeli ele alınmıştır. Kat sayısı ve kat yükseklikleri standart olacak şekilde toplamda 7 kat ile sınırlandırılmıştır. Bunun yanısıra kazıklara gelen yük dağılımının yalnızca radye plak rijitlik etkisi bakımından incelenebilmesi için model geometrisi için her doğrultuda simetrik olan bir aplikasyon planı üzerinden ilerlenmiştir. Model geometrisi ve sınır koşulları, Sistem statik yük sınır koşulları için, zati yük (G) ve hareketli yük (Q) kombinasyonlarının, dikkate alınan zemin profili için elverişsiz durumu yaratması ve temel sisteminin kazıklı temel olacak şekilde sonuçlanması üzerine bir senaryo ile kurulmuştur.

Kutlu ve Kılıç'ın 2019 yılındaki ön çalışma niteliğindeki yayınlarında yer alan ve sunulan mevcut çalışmaya esas teşkil

eden; üst yapı modeli, temele aktarılan yükler ve geoteknik ön tasarımı tamamlanmış olan radye ve kazıklı temel modeli, farklı parametre etkilerinin detaylı irdelenmesi amacıyla bu çalışmada tekrar ele alınmıştır. Referans kaynakta kullanılan ön tasarım parametreleri ve mevcut analizlerle ilgili olan sonuçlara ilerleyen bölümlerde bilgi ve karşılaştırma amaçlı olarak yer verilmiştir.

Sunulan çalışma kapsamında pratik uygulamalara yönelik olarak, inşaat mühendisliği yapısal çözümlemesinde yaygın olarak kullanılan SAP2000 programı kullanılarak, kazık-zemin-radye etkileşiminde radyenin yalnızca kazık başlığı olarak çalıştığı kabulü ile radye kalınlığının tek başına değişiminin üst yapıdan aktarılan yüklerin dağılımına ve kazıklara aktarılan yüklerin büyüklüğündeki değişime olan etkisi incelenmiştir.

Yapı, farklı kayma mukavemeti parametrelerine sahip üç ayrı kil tabakası ile idealize edilmiş olan zemin profili üzerinde yer almaktadır. Zemin profilinde yer alan üç tabakaya ait zemin parametreleri Çizelge 1'de özetlenmektedir. Tabaka mukavemet değerleri saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen değerlerin birlikte değerlendirilmesi ile idealleştirilmiştir. İnce daneli kil zeminlerin kritik durum mukavemet değerlerini temsil eden drenajsız kayma muavemeti yanısıra, Çizelgede verilen elastisite modülü değerleri, farklı zemin cinsleri için drenajsız kayma mukavemeti değerlerine uygun olarak belirlenmiştir (Bowles, 1988). Çizelge 1 'de verilen zemin parametreleri, SAP 2000 programında zemin-yapı etkileşimini dolaylı olarak tarif etmek için kullanılacaktır. Elastisite modülü ve drenajsız kayma mukavemeti değerleri analizin ilerleyen aşamalarında lineer yay modeli için düşey, yatay yatak katsayısı ve sonrasında düşey, yatay yay sabitlerinin belirlenmesinde kullanılacaktır. Non-linear t-z, q-z ve p-y eğrilerinin tariflenmesi için ise drenajsız kayma mukavemeti değerlerinden faydalanılmıştır.

Yüzeysel temel durumunda yapıdan kaynaklı zemin gerilmeleri nedeniyle kil tabakalarında meydana gelecek olan oturmaların yapı için izin verilebilir deformasyon sınırla-

Çizelge 1. İdeal zemin profili zemin mühendislik özellikleri.

Tabaka	Derinlik (m)	Doğal birim hacim ağırlık, $\gamma_{unsat}/\gamma_{sat}$ (kN/m ³)	Elastisite modülü, E (MPa) (Bowles, 1988)	Poisson oranı, ν (Bowles, 1988)	Drenajsız kayma mukavemeti, c_u (kPa)
Yumuşak siltli kil	0.0-6.0	19/20	20	0.2	45
Orta katı siltli kil	6.0-12.0	19/20	40	0.2	60
Katı killi silt	12.0-60.0	20/21	80	0.3	120-160

rının ötesinde olduğundan yapı temeli derin temel olarak tasarlanmıştır. Ön boyutlandırmada derin temel sistemini oluşturan kazıkların her biri 1m çapa ve 31.0m boya sahip olacak şekilde toplam 67 adet kazık ile temel sistemi analizi tamamlanmıştır (Kutlu ve Kılıç, 2019). Kazık yerleşim planı Şekil 1'de verilmektedir. Tekil kazık taşıma gücü dayanımları grup kazıklı sistemlerde azalma gösterebilmektedir. Grup kazıklı sistem tasarımlarında bu nedenle, kazıklar arasında belirli bir aralık belirleyerek bu azalmayı sınırlamak yaygın bir yaklaşımdır. Gerekli mesafe sürtünme kazıkları ve uç kazıkları için farklılık göstermektedir. Çalışma kapsamında ele alınan kazıklar sürtünme kazıkları olmalarından ötürü, BS8004:2015 Temel uygulama standartlarında belirtildiği üzere, genel olarak uygulanan kaide, dairesel kazıklarda, merkezden merkeze mesafenin en az üç kazık çapı değerinde olması gerekliliğidir. Ele alınan modelde, bu etkinin dikkate alınmaması için, kazık aralıkları minimum üç kazık çapı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu şartın sağlanması ile kazıkların aksel taşıma gücü değerlerinde bir azalma olmayacağı, diğer bir deyişle grup kazık etkisinin devreye girmeyeceği söylenebilmektedir. Bu şekilde aksel yük dayanımı tekil kazık göçme dayanımı olarak dikkate alınmıştır. Kazık blok davranışı ve göçme mekanizması hesaplanmıştır.

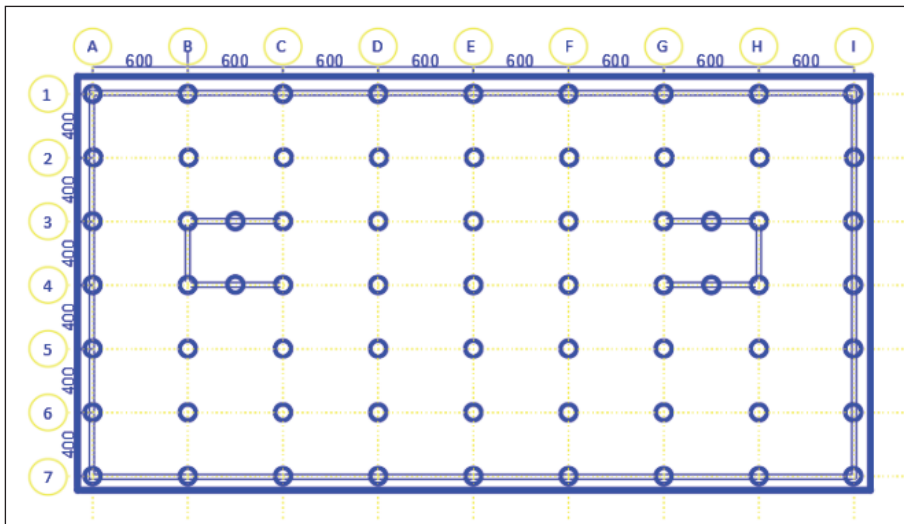
Bunun yanı sıra, analizde, daha konservatif olduğu düşünülen, alt temelin deformasyon davranışı ihmal edilerek, radye-zemin etkileşimine esas katkının dikkate alınmadığı şekilde, yalnızca kazık elastik davranışı ve kazık-zemin etkileşiminden doğan düşey deformasyon davranışına dayanmaktadır.

Yapı temeli ön boyutlandırması servis durumu için SAP2000 programında üst yapı özelliklerine bağlı olarak tek bir düşey yük kombinasyonu (G+Q) için gerçekleştirilmiştir. Yapı ve temel ağırlığı bu şekilde radye altında perde, kolon bağlantılarına tanımlanan sabit mesnet reaksiyonlarının toplamı olarak hesaplanmıştır. Bu şekilde radye altındaki kazıklara tamamen rijit bir yük dağılımı sağlanmış olacağından, bu modelden elde edilen en büyük mesnet reaksiyon kuvveti, kazık tasarım yükü olarak kabul edilmiş ve ampirik kazık taşıma gücü bağıntıları kullanılarak kazık çap ve uzunluğu belirlenmiştir.

Çalışmada ilk analize esas alınan üst yapı yapısal eleman boyutları, temel boyutları ve yükleme durumu Çizelge 2'de özetlenmektedir. Tabloda verilen toplam ağırlık, radye kalınlığını 1.0m kabul ederek hesaplanmış ve aynı tabloda görüleceği gibi en büyük mesnet kuvvet değeri referans alınarak tekil kazık çapı 1.0m ve kazık toplam boyu radye plak altından itibaren 31.0m olarak hesaplanmıştır. Şekil 1'de kazık yerleşim planı detaylı şekilde gösterilmektedir.

Çizelge 2. Üst yapı ve temel sistemi boyutları (SAP2000).

Kolon (cm)	Kiriş (cm)	Perde duvar (cm)	Radye temel alanı (m x m)	Radye Plak kalınlığı (m)	Döşeme kalınlığı (cm)	Bina alanı (m x m)	Yükleme	Toplam ağırlık (kN)	Maksimum Mesnet Kuvveti (kN)	Tekil kazık çapı (m)	Tekil kazık toplam boy (m)
40x40	30x60	30.0	26x50	1.0	15.0	24x48	G+Q	122570	2700	1.0	31.0



Şekil 1. Kazık yerleşim planı.

2.2. Farklı Radye Kalınlıkları İçin Grup Kazıklı Temel Tasarımı: (SAP2000)

Yeterli rijitliğe sahip radye plak kabulü ile kazık-radye bağlantı noktalarının sabit mesnet olarak tanımlanmasıyla elde edilen kazık yükleri bu kez, kazıkların ve kazık-zemin etkileşiminin şaft boyunca ve uçta tariflenerek modele atanması suretiyle incelemeye tabi tutulmuştur. Kazıklar $\varnothing 1000$ mm. çapında C30/25 beton sınıfında, lineer-elastik davranış gösteren çubuk eleman olarak SAP2000 programında tanımlanmıştır. Kazık olarak modellenen çubuk kesitler 2 m.'lik segmentler halinde bölünerek ilgili düğüm noktalarına noktasal zemin yayı tanımlaması, link ataması yapılmıştır. Bu şekilde oluşturulan detaylı altyapı modeli üzerinden radye kalınlığı değiştirilerek temel rijitliğine bağlı olarak kazıklara gelen eksenel yüklerin değişimi hesapsal olarak gözlenmiştir. Bu bölümde öncelikle kazık-zemin etkileşimine dair kriterler kısaca tanımlanmakta ve elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

2.3. Kazık Zemin Etkileşim Kriterleri

Eksenel yüklü kazıklarda, yük-deplasman ilişkisi üç farklı mekanizma olarak, kazıktaki eksenel deformasyon, kazık boyunca oluşacak sürtünme direnci ve kazık uç direnci ile kontrol edilmektedir (Tomlinson ve Woodward 2014). Yapısal analiz programı olan SAP 2000, kazıklı yapı modellerinde, kazık eksenel deformasyon mekanizmasını doğrudan hesaba katabilmekte ancak kazık-zemin etkileşiminin analiz yöntemine göre; lineer veya non-lineer olmak üzere, farklı koşullar altında sisteme tanıtılması gerekmektedir.

Zemin uç direnci ve şaft boyunca oluşacak sürtünme direncinin tanımlanması iki şekilde yapılabilmektedir. Bunlar; i. lineer analiz yöntemlerinde, eşdeğer lineer yay sabitlerinin, Winkler yöntemi ile, (düşey yaylar, k_v ve yatay yaylar, k_h) tarif edilmesi (Bowles 1988) ve ii. non-lineer analiz yöntemlerinde, non-lineer zemin yayı (link) modeli (t-z, Q_z ve p-y eğrileri ile) (API-RP2A-WSD 2000) tariflenmesi şeklindedir.

Yapısal sistemlerde ilişkili ulusal ve uluslararası şartnamelerde daimi veya oluşma sıklığı yüksek olan yüklere göre olan işletme durumu hesap ve tasarımında yapısal kesitlerin ve benzer şekilde kazık-zemin etkileşiminin plastik davranış sergilemesine izin verilmemektedir. Başka bir deyişle yapısal elemanlara elastoplastik davranış özellikleri atansa dahi yük-deformasyon durumunun elastik bölgede kalması veya temin edilmesi gerekmektedir. Bu tip çözümlerde lineer analiz yöntemleri kullanılmakta olup yapı yük ve elastik deformasyon bazlı bir analize tabi tutulmuş olur.

Söz konusu duruma karşın oluşma sıklığı düşük olan ekstrem yükler halinde (deprem durumu vs.) belirli durumlarda belirli plastik davranışa izin verilebilmektedir. Bu tip çözümlerde non-lineer çözüm yöntemleri kullanılmakta olup yapı plastik deformasyon odaklı bir analize tabi tutulmuş olur. Tasarım ise işletme çözümündeki elastik boyutlandırma ve kontrol durumunun aksine plastik şekil değiştirmelerin belirli sınır değerler nispetinde kontrol edilmesi ile tamamlanır.

Yukarıdaki sistem davranış kıstasları dikkate alındığında bu çalışmada daimi yüklere göre yapılan analizler işletme durumuna karşı gelmekte olup yapısal kesitlerde olduğu gibi kazık-zemin etkileşiminde de nonlineer davranış dikkate alınmayacaktır. Bu durumda kazık kesitlerine lineer yay kabulü yapılması yeterli olmaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında (değişken radye kalınlığı analizlerinde) daha ileri bir kazık-zemin etkileşim modeli olan nonlineer zemin yayı (link) tanımlaması tercih edilmiştir. Lineer olarak yapılan sistem çözümünde yapısal program, tanımlanmış olan elastoplastik yayların elastik bölgesini dikkate aldığından dolayı bu zemin modelinin lineer analizlerde dikkate alınması uygundur. Kıyaslama ve merteye kontrolü açısından belirli bir radye kalınlığı için lineer yay kabulü ile ayrıca bir analiz de yapılmış ve çalışma sonuçlarına dahil edilmiştir.

2.3.1. Lineer yay kabulü

Lineer hesap yönteminde kazık-zemin etkileşimi için kullanılan en yaygın yöntem, kazığın zemin ile etkileşim içerisinde olduğu tüm bölge boyunca lineer zemin yayları tanımlamaktır. Lineer zemin yayları direkt olarak ilgili zemin yatak katsayısı değerinin, (yatay, k_h , düşey, k_v), kazık çapı (D) veya yayın temsil ettiği yüzey alanı ile kazık şekil faktörü olarak da anılan sürüklenme kuvveti sabiti'nin çarpımı şeklinde ifade edilmektedir.

Pratik uygulamalarda, eksenel yüklü kazıkların modellenmesine yönelik tercih edilebilecek bu yöntem için, zemin tabakalarına ait uygun elastisite modülü ve zemin yatak katsayılarıyla lineer analiz için lineer yay sabitleri tayin edilmektedir. Çalışmada yer alan idealize zemin profilindeki tabakalara ait zemin yatak katsayısı değerleri ve yay sabitleri Çizelge 3'de verilmektedir. Lineer yay kabulü ile çözümlenen sistemlerde düşey yer değiştirme lineer bir eğri ile tanımlandığı ve sistemde plastikleşme (mafsallaşma) durumları analiz gereği incelenmediği için düşey taşıma gücü kontrolleri yapılmalıdır. (Kutlu, 2011).

Çizelge 3. Kazık-zemin etkileşimi lineer yay sabitleri.

Tabaka	Derinlik (m)	Yatak katsayıları		Eşdeğer lineer yay sabitleri		Bölge
		k_v , düşey (t/m ³)	k_h , yatay (t/m ³)	k'_v , düşey (t/m ³)	k'_h , yatay (t/m ³)	
Yumuşak siltli kil	0.0-6.0	1335	302	4193	211	şaft
Orta katı siltli kil	6.0-12.0	1844	408	5790	285	şaft
Katı killi silt	12.0-31.0	7124	1072	22372	750	şaft
Katı killi silt	31.0-60.0	8635	1206	27118	845	uç

Çizelge 4. Kil zeminler için t-z, Q-z ve p-y eğrilerine esas bağıntılar.

t-z eğrisi		Q-z eğrisi		p-y eğrisi	
z/D	t/t_{max}	z/D	Q/Q_p	p/p_u	y/y_c
0.0016	0.3	0.002	0.25	0.00	0.0
0.0031	0.5	0.013	0.50	0.50	1.0
0.0057	0.75	0.042	0.75	0.72	3.0
0.008	0.90	0.073	0.90	$0.72 X/X_R$	15.0
0.01	1.00	0.100	1.00	$0.72 X/X_R$	∞
0.02	0.7-0.9				
∞	0.7-0.9				

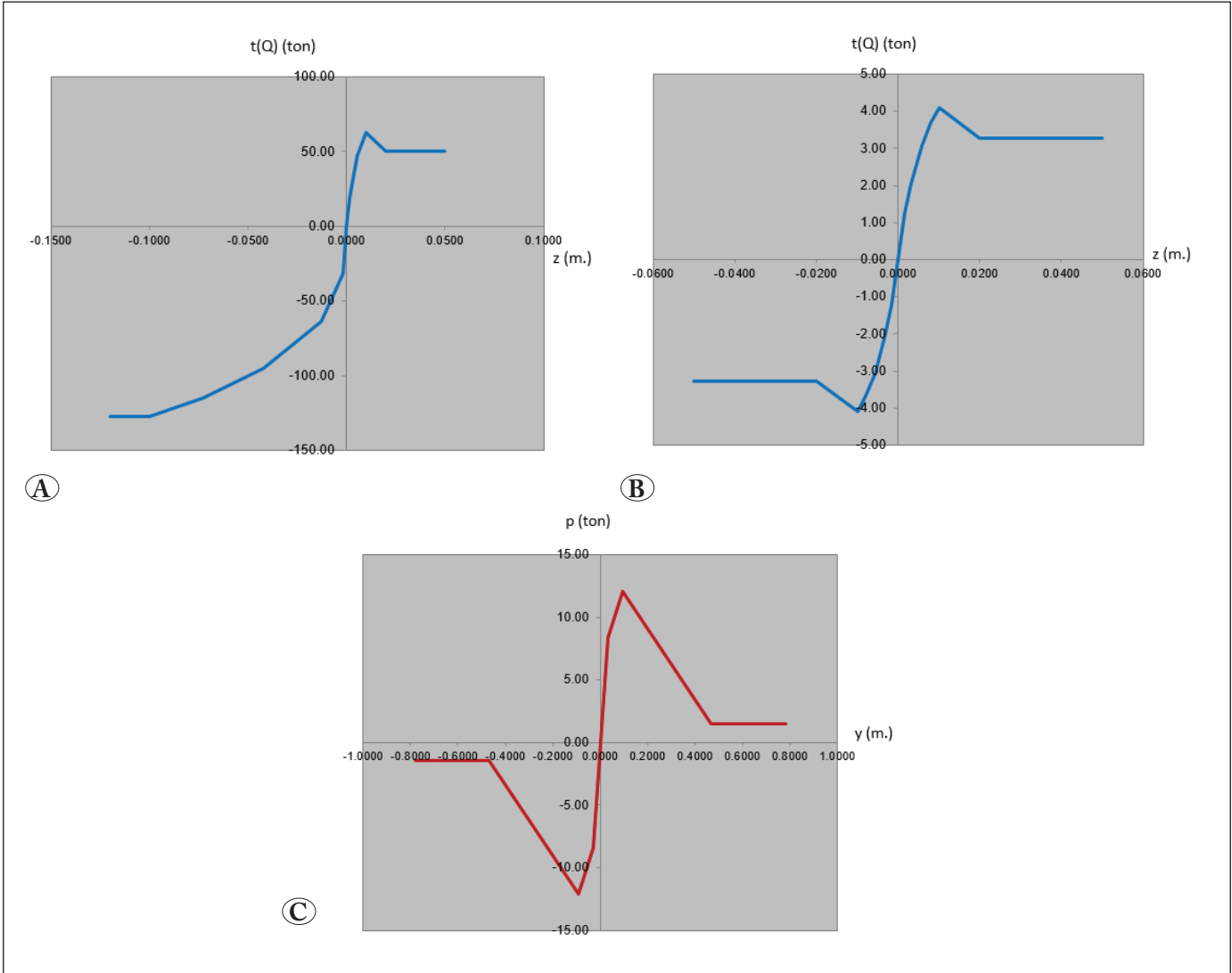
2.3.2. Elasto-plastik Zemin Davranışını Temsil Eden Link Kabulü:

Doğadaki malzemelerin gerilme - şekil değiştirme ilişkileri idealden farklılık göstererek karmaşık malzeme modelleri sergilemektedir (visco-elastik, nonlineer elastik, plastik, elastoplastik, gevrek, pekleşen ve yumuşayan vb.). Non-linear analiz çerçevesinde hesabı yapılan temel ve zemin etkileşimi, non-linear davranışa esas zemin yayları ile ele alınır ve böylece plastik bölge davranışı da hesaba katılır. Bu nedenle modellemede ideal elasto-plastik davranış veya pekleşme etkisini dikkate alan ideal olmayan elasto plastik davranış modelleri üzerinden hesap yapılması yaygın olarak kullanılmaktadır.

Günümüzde bilgisayar programları ile yapılan non-linear analizlerde malzemelerin karmaşık gerilme-şekil değiştirme bağıntıları programa tariflenerek analiz yapılabilmektedir. Titizlikle hesaplanmış t-z ve Q-z eğrilerinin sisteme tanıtılmasıyla sistemin başka bölgelerinde oluşabilecek olan mafsallaşmalar ve bunlara bağlı şekil değiştirmelerin izin verilen sınırlar dahilinde kalıp kalmadığının incelenmesi hesap yönteminin dikkat edilmesi gereken bir esasıdır (Kutlu 2011).

Zemin modelleri için de durum benzerdir. Kazık - zemin ilişkisinin modellenmesinde iki farklı gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ile üç doğrultuda link özellikleri tanımlanmaktadır. Söz konusu gerilme-şekil değiştirme bağıntıları kazığın zemin ile olan düşey ilişkisini temsil eden t-z eğrileri (kazık ucunda Q-z eğrileri) ve yatay ilişkisini temsil eden p-y eğrileri olmaktadır. p-y, t-z ve Q-z eğrilerinin hesap prensipleri, API-RP2A-WSD şartnamesinde detaylı olarak açıklanmaktadır.

Buna göre t-z ve Q-z eksenel yük mekanizması eğrileri, killer için, $t_{max} = f_s = ac_u$, Q-z eğrileri için de toplam kazık uç direnci, $Q_p = 9cuA_p$ şeklinde ifade edilmektedir. Burada, t_{max} : birim çevre sürtünmesi (maksimum zemin-kazık adezyonu), t: mobilize zemin kazık adezyon değeri (kPa), D: kazık çapı (mm), z: lokal kazık deplasmanı (mm) ve/veya eksenel kazık uç deformasyonu (mm), Q_p : toplam uç kapasitesi (kN), Q: mobilize uç taşıma kapasitesi (kN) şeklindedir. p-y yatay yükleme eğrilerinde ise, p_u : nihai yatay taşıma kapasitesi (kPa), p: mevcut yatay direnç (kPa) ve y: yatay deformasyon (mm) şeklindedir. İlgili eğrilerde gerilme - şekil değiştirme grafiğinde gerilme eksenli yük, şekil değiştirme eksenli ise deplasman olarak ele alınmakta ve bu şekilde ilgili eğriler yük - deplasman eğrileri olarak Çizelge 4'te verildiği şekilde elde edilmektedir.



Şekil 2. A) İlk link için tanımlanan t-z eğrisi, B) kazık ucunda son link için tanımlanan t-z + Q-z eğrisi C) ilk link için p-y eğrisi.

Çalışmada, ön boyutlandırması yapılmış olan kazıklar ve kazık-zemin etkileşimi tüm kazık shaftı boyunca ve kazık ucunda, bahsedilen bu elastoplastik yaylar API-RP2A-WSD (2000)'de verildiği şekilde tariflenmiştir. Şekil 2'de verilen non-lineer linklerin bir örneği Çizelge 5'de verilen link parametreleri kullanılarak ve temsili verilen çizime benzer şekilde tariflenerek hesaplanmıştır. Tabloda takip edilebileceği üzere kazık boyunca toplamda 16 adet link tariflenmiştir. İlk link hariç, diğer her bir link, kazığı 2m'lik parçalara bölerek kazık-zemin etkileşim davranışını tarif eder. Radye plak altına herhangi bir şekilde yay tariflenmemiş ve bu şekilde yüklerin doğrudan kazıklara aktarımı sağlanmıştır. Bu sayede, kazık elastik eksenel deformasyonları (EA/L), zemin elastik deformasyon davranışı (yay davranışı) ve radye temel eğilme rijitliğinin, kazık yük dağılımına etkisi incelenmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Kazıklı temellerin yapısal modellenme çeşitliliklerini temel alan bu çalışma kapsamında farklı kazık-zemin etkileşim kriterlerini dikkate alan üç ayrı yaklaşım ele alınmıştır. Bunlar sırasıyla, i. basit model: ankastre mesnet modeli, ii. detaylı yapısal model: eş değer lineer yay kabulü, iii. detaylı yapısal model: non-lineer zemin yayları şeklindedir. İlk iki yaklaşım kazıkların ön boyutlandırması için kullanılmış ve tek radye kalınlığı için hesaplanmıştır. Son model yaklaşımında, kazık konfigürasyonu (çap, yerleşim ve boyları) analiz boyunca sabit tutularak farklı radye kalınlıkları için model tekrarlı şekilde çözülmüştür. Bu şekilde, farklı eğilme rijitlikleri için kazıklara aktarılan yük dağılımı, radye gerilme dağılımı ve oturma davranışı irdelenmiştir. Tariflenen yük-deformasyon eğrilerinin kazığın tüm uzunluğu boyunca tarif

edilmesi ile analizler, aynı yük kombinasyonu için sırasıyla, radye kalınlıklarının, 0.5m, 1.0m, 1.5m ve 2.0m değerleri için gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde radye modeli, esnek bir plaktan, rijit bir plağa doğru ele alınmıştır.

Çizelge 5. Non-linear zemin yayı (link) parametreleri (API) ve linklerin temsili lokasyonları.

Link no	Uzunluk (m)	f_s (kN/m ²)	Q (kN)	P_u (kN/m ²)
1	1	12.99	1440	167.5
2	2	17.32		300
3	2	24.49		380
4	2	30.00		460
5	2	48.99		1590
6	2	54.77		1440
7	2	60.00		
8	2	64.81		
9	2	69.28		
10	2	73.48		
11	2	77.46		
12	2	81.24		
13	2	84.85		
14	2	88.32		
15	2	91.65		
16	2	100	1272	

Çizelge 6'da, kazık yerleşim planında verilen kazıklardan en çok yük alanlar, aldıkları yükler ve kazık grubu toplam oturma değerleri verilmiştir. Kazıklara aktarılan yükler ve deplasmanlar kazık üst düğüm noktalarından ve en üst istasyon noktasından okunmuştur. Sunulan analiz sonuçlarına göre, radye rijitleştikçe üst yapıdan gelen yükler radye altında düzgün yayılı yüklenme durumuna yakınsayarak nispeten homojen bir yük dağılımı meydana getirmektedir. Yapısal çözüm sonucu en çok yüklenen kazıklar, kazıkların yük aldığı alanların geometrik olarak iç kısımlarda dış kazıklara nispetle daha yüksek değerlerde olması sebebiyle ortadaki kazıklar olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, radye kalınlığı azaldıkça düşük radye rijitliği ve nispeten yüksek deformasyon özelliklerine bağlı olarak asansör perdeleri gibi rijit üst yapı elemanları ve kolonlar altında yüklemeler yoğunlaşmaktadır. Bu durumda Şekil 3'te görüldüğü gibi; radye temel yük dağılımının düzgün yayılı olmayan yüklenme davranışı gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 6. Radye kalınlığına bağlı yük dağılımının en fazla yük alan beş kazık için değerlendirmesi.

Kazık No.	Radye plak kalınlığı (m)	Kazık Yükleri (SAP 2000) (kN)	Deplasman (m)
484	0.5	1951	0.0033
354		1934	
476		1916	
234		1913	
242		1904	
354	1.0	2195	0.0035
346		2161	
394		2118	
314		2122	
362	1.5	2148	0.0040
354		2434	
346		2403	
362		2382	
314		2370	
394	2.0	2370	0.0043
354		2659	
346		2635	
362		2610	
314		2602	
394		2600	

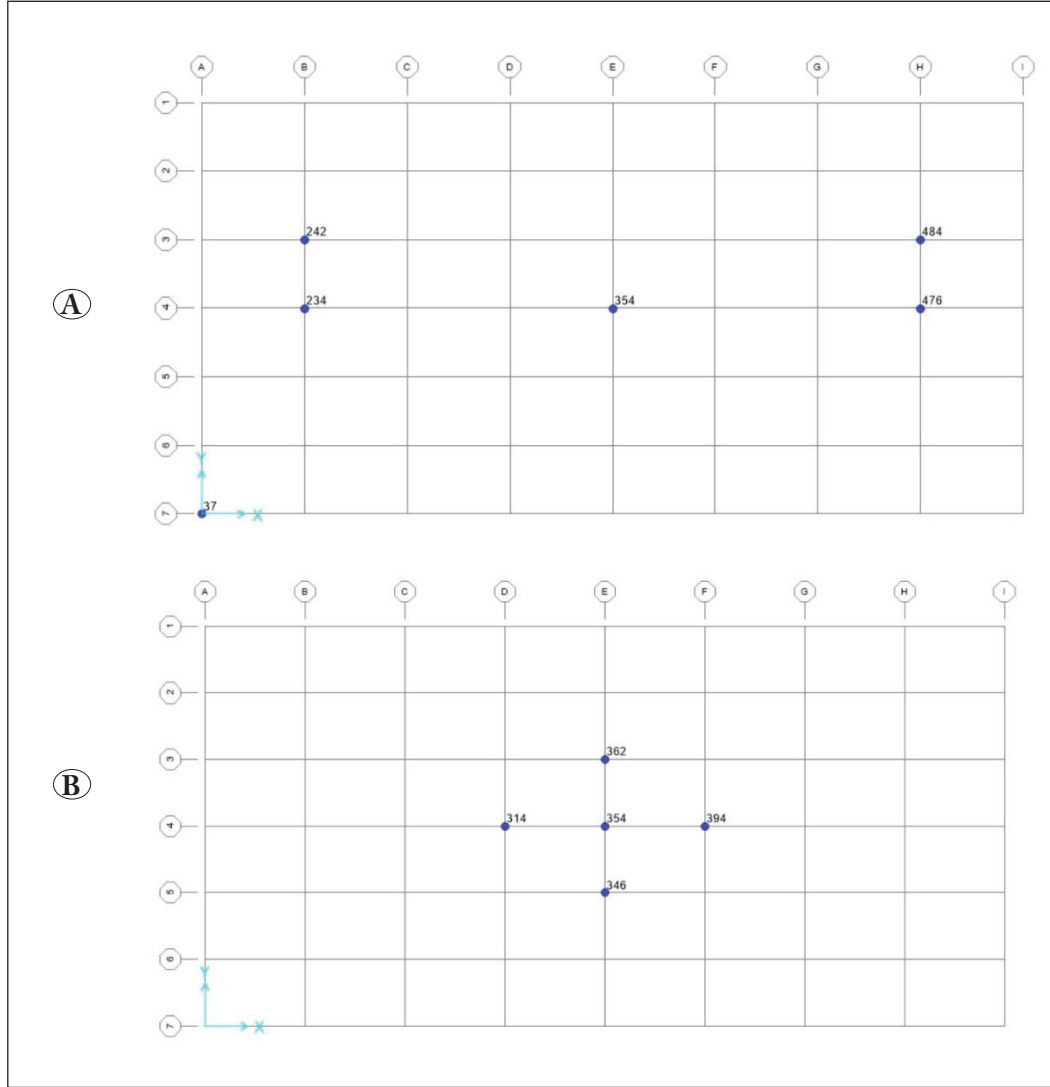
Söz konusu davranış zemin üzerine oturan düzgün yayılı yüklü temel plaklarında beklendiği şekildedir. Şekil 4'te şematik olarak gösterildiği üzere, esnek temellerde üst yapı yüklemesi plağın kesitteki elastik eğrisine orantılı bir oturma ve taban basıncı dağılımı ortaya çıkarırken, temel rijitleştikçe taban basıncı dağılımı üniform hale gelmektedir.

Aynı sistem davranışı modelden elde edilen plak gerilmeleri için de görülebilmektedir. Şekil 5'te gösterildiği gibi, esnek radyede gerilmeler kolon altlarında yoğunlaşırken, radye kalınlığı arttıkça dağılım daha üniform ve yumuşak geçişlere yerini bırakmaktadır.

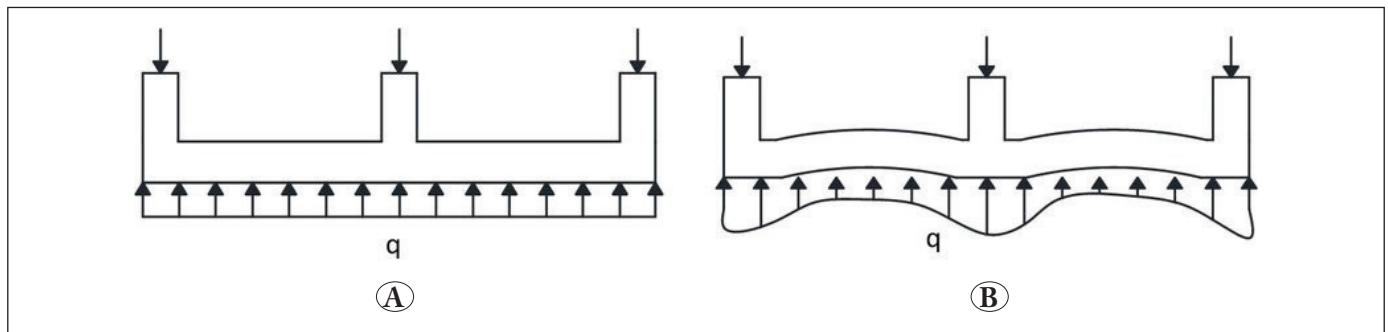
Bu nedenle pratik mühendislik uygulamalarında radyenin etkili şekilde yük dağılımını yapabilmesi için plağın yeterli derecede bir rijitliğe sahip olması gerekmektedir. Sunulan bu çalışmada radye kalınlığının 1m'nin üzerine çıktığı değerlerde radyenin yükü etkili dağıttığı görülmektedir. Ancak

radye temel in zati yük değeri de kalınlık ile orantılı olarak arttığı için belirli bir radye kalınlığının üzerinde yük her ne kadar daha efektif dağılsa dahi, kalınlıktan kaynaklanan ilave düşey yükler sebebiyle kazık yükleri de artacaktır. Dolayısıyla makul bir altyapı tasarımı yapabilmek için radye

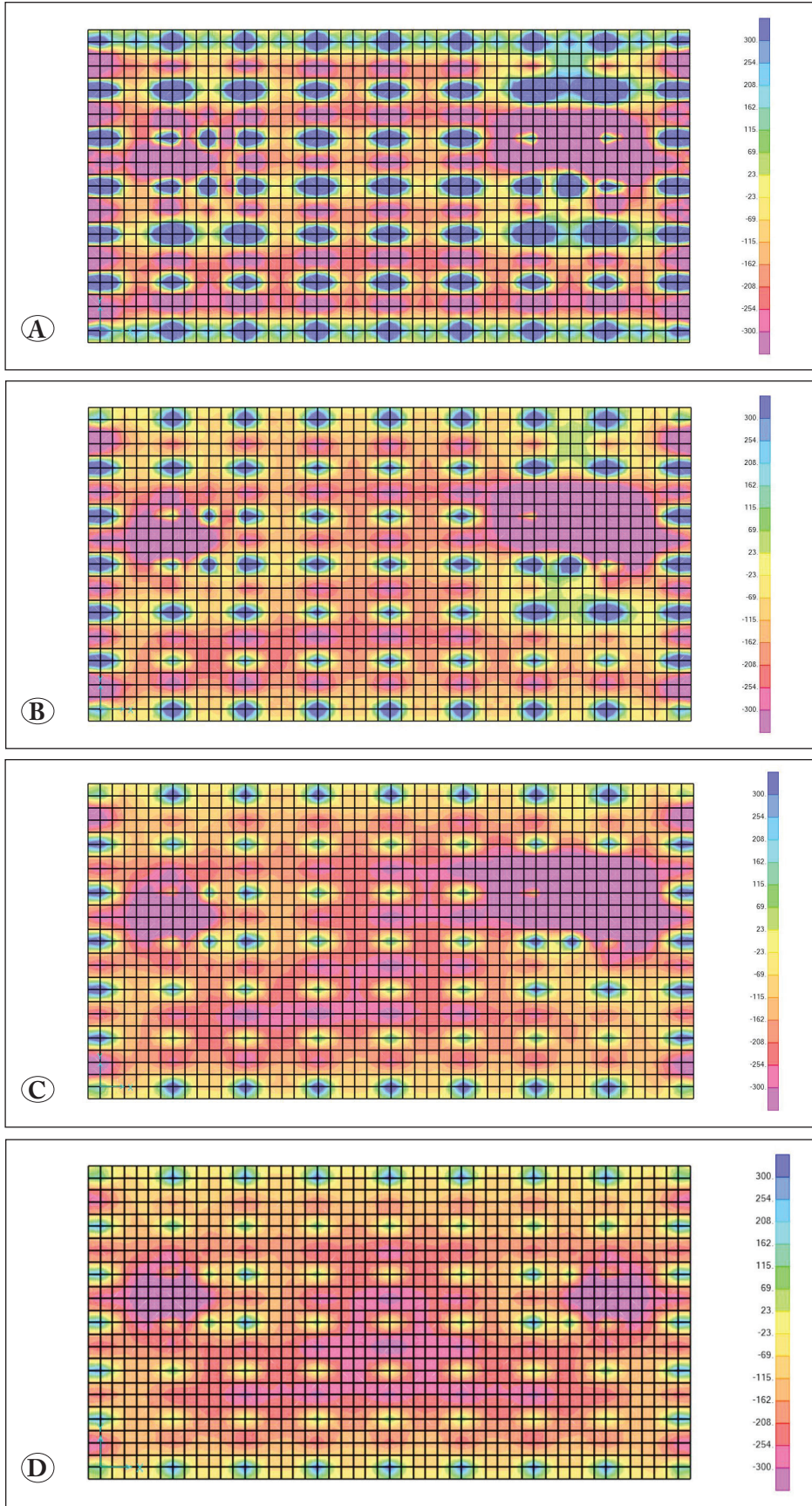
kalınlığı seçiminin proje özelliklerine bağı bir optimizasyon çalışması olduğu unutulmamalıdır. Sonuçlarda, grup kazık oturma değerlerine bakıldığında, radye kalınlığı artışı ile oturma değerlerinin arttığı görülebilmektedir. Bunun nedeni, beklenen bir sonuç olarak, radye kalınlığının artması ile



Şekil 3. Radye rijitliğine bağı kazıklara aktarılan yük dağılımları ve en çok yük alan beş kazığın gösterimi (A) Radye kalınlığı = 0.5m, (B) Radye kalınlığı = 1.0m, 1.5m, 2.0m



Şekil 4. Plak temel taban basıncı dağılımı (A) Rijit temel, (B) Esnek temel.



Şekil 5. Radye plağı üzerinde plak kalınlığına bağlı gerilme dağılımı **(A)** Radye kalınlığı = 0.5 m, **(B)** Radye kalınlığı = 1.0 m, **(C)** Radye kalınlığı = 1.5 m, **(D)** Radye kalınlığı = 2.0 m.

Çizelge 7. Analiz toplu sonuçları.

Model #	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
Kazık-Zemin etkileşim kriteri	Basit model	Detaylı yapısal model	Detaylı yapısal model			
	Ankastre mesnet	Eş değer lineer yaylar	Non-lineer yaylar (kazık-zemin linkleri)			
Radye kalınlığı (m)	1.0	1.0	0.5	1.0	1.5	2.0
Maksimum yük (kN)	2700	2227	1951	2195	2434	2659

öz ağırlığın artması ile oturmaların artması şeklinde yorumlanmaktadır.

Çizelge 7'de analiz sonuçları toplu olarak sunulmaktadır. Buna göre, sonuçlardan görüldüğü üzere, kazıkların ankastre mesnet olarak kabul edildiği ilk basit modelde en büyük kazık yükü değerleri elde edilmiştir. Radyenin eğilme rijitliğine bağlı olarak deformasyon özellikleri dikkate alındığında kazıklı temelin yaylarla modellenmesi durumunda gerçekte beklenen yapısal davranışa denk gelen daha düşük mertebede kazık kuvvetleri elde edilmiştir.

SAP 2000 ile yapısal modelde zemin-yapı davranışı, yük-deformasyon ilişkileri şeklinde ilgili yaylar ile ifade edilip radye altında herhangi bir temel altı zemin direnci katkısı dikkate alınmamıştır. Bu sayede daha güvenli tarafta kalınmış olup, radye ile zemin arası olası konstrüktif temas zaafına bağlı davranış bilinmezlikleri de değerlendirme dışı bırakılmış olur. Değerlendirme sonucunda, lineer zemin yayı modellenmesi ile literatürden farklı bir parametrik yaklaşımla modellenen kazık-zemin etkileşiminin, daha ileri bir model olan ve daha farklı bir parametrik yaklaşımı olan non-lineer kazık modellenmesi ile uyumlu sonuç verdiği de ayrıca gözlemlenerek mertebenin doğruluğu ve her iki modelleme yaklaşımının da uygunluğu ayrıca teyit edilmiştir. Çizelge 7'de verilen sonuçlar arasında bu karşılaştırma Model 2 ve Model 4 arasında yapılabilmektedir. Sözü edilen model sonuçları arasında %1.5 gibi çok küçük bir fark bulunmaktadır. Bu da statik yükler altında servis durumunda zemin yaylarının lineer yay katsayıları ile tariflenmesinin yine pratik bakımdan kabul göreceğini göstermektedir.

Bu sayede, ileri zemin modellemelerini esas alan zeminlerin sürekli ortam olarak tarif edildiği sonlu eleman yazılım çözümlerinde, zemine ait karakterizasyonun yapılması, kazıklı temel sistemlerindeki gerilme etkileşimleri, radye altındaki zemin katkısı gibi bir çok faktör üzerinde tam kontrol sahibi olmak güçtür. Bunun aksine SAP2000 yapısal analiz çözümünde kullanılan her üç metodolojide de elde edilen

sonuçlara bakıldığında, yapı ve geoteknik mühendisleri için ortak bir model dili sunması, sonucu etkileyecek parametrelerin gerektiği şekilde kontrol edilebilmesi, daha pratik bir çözüm yöntemini ortaya çıkarmaktadır.

5. Kaynaklar

- API-RP2A-WSD, American Petroleum Institute, 2000.** Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms- working stress design, 21st Edition, API Publishing Services, Washington D.C., USA 223 pp.
- Bowles, J. E., 1988.** Foundation Analysis and Design, 4th Edition, McGraw-Hill Book Company, UK, 1023 pp.
- Comodromos, E. M., Bareka, S. V. 2009.** Response evaluation of axially loaded fixed-head pile groups in clayey soils. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 33:1839-1865. Doi: 10.1002/nag.787
- Cunha, R. P., Poulos, H. G., Small, J. C. 2001.** Investigation of design alternatives for a piled raft case history. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 127(8): 635-641. Doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:8(635)
- Kalita, M., Nath, U. K., Hazarika, P. J. 2021.** Effect of pile spacing and raft thickness on the behaviour of piled-raft foundation—a parametric study using FEM. *Advances in Structural Technologies*, 111-122. DOI: 10.1007/978-981-15-5235-9_9
- Kumar, A., Patil, M., Choudhury, D. 2016.** Soil-structure interaction in a combined pile-raft foundation – a case study. *Proceedings of the Institution of Civil Eng.-Geotechnical Eng.*, 170(2): 117-128. Doi: 10.1680/jgeen.16.00075
- Kutlu, Z. N., Kılıç İ. E., 2019.** Pile group foundation behavior analysis of a building under axial loading. *Proceedings of 8th International Geotechnical Symposium*, pp. 858-869, Istanbul, Turkey.
- Kutlu, Y. 2011.** Deniz üstü rüzgar türbini temel tasarımı ve Türkiye'de kazıklı bir uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- Lee, J., Kim, Y., Jeong, S. 2010.** Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay. *Computers and Geotechnics*, 37(1-2): 103–114. Doi: 10.1016/j.compgeo.2009.07.009
- Leung, Y. F., Klar, A., Soga, K. 2010.** Theoretical study on pile length optimization of pile groups and piled rafts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 136(2): 319-330. Doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000206
- Liang, F., Chena, L., Shib, X. 2003.** Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load. *Computers and Geotechnics*, 30(6): 443–453. Doi: 10.1016/S0266-352X(03)00057-0
- Lin, D., Feng, Z. 2006.** A numerical study of piled raft foundations. *Journal of the Chinese Institute of Eng.*, 29(6): 1091-1097. Doi: 10.1080/02533839.2006.9671208
- Long, P. D. 2010.** Piled raft—a cost-effective foundation method for high-rises. *Geotechnical Eng. Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 41(3): 1-12. ISSN 0046-5828
- Mali, S. M. 2019.** 3D numerical modeling of large piled-raft foundation on clayey soils for different loadings and pile-raft configurations. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 42(1): 1-17. Doi: 10.2478/sgem-2019-0026
- Mandolini, A., Viggiani, C. 1997.** Settlement of piled foundations. *Géotechnique*, 47(4): 791–816. Doi: 10.1680/geot.1997.47.4.791
- Manjunath, N. V., Soundara, B., Ranjitham, M. 2018.** Effect of modulus of subgrade reactions on the static behavior of raft foundation resting on sand. *Int. J. of Pure and Applied Mathematics*, 119(18): 2649–2661. ISSN: 1314–3395.
- Modak, R. Singh B. 2022.** Parametric study of the behavior of large piled raft foundation on stiff clay. *Foundation and Forensic Geotechnical Engineering*, 43-54. DOI: 10.1007/978-981-19-6359-9_5
- Nguyen, D. D. C., Jo, S. B, Kim, D. S. 2013.** Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effects. *Computers and Geotechnics*, 47: 16–27. Doi: 10.1016/j.compgeo.2012.06.007
- Oh, E. Y., Lin, D. G., Bui, Q. M., Huang, M. 2009.** Numerical analysis of piled raft foundation in sandy and clayey soils. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 1159-1162, Alexandrina, Egypt.
- Poulos, H. G. 2001.** Piled raft foundations design and applications. *Géotechnique*, 51(2): 95–113. Doi: 10.1680/geot.2001.51.2.95
- Randolph, M. F. 1994.** Design methods for pile groups and piled rafts. Proc. 13th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 61–82, New Delhi, India.
- Reul, O., Randolph, M. F. 2003.** Piled rafts in overconsolidated clay comparison of in situ measurements and numerical analyses. *Géotechnique*, 53(3): 301–315. Doi: 10.1680/geot.2003.53.3.301
- Saeed, H. H. 2022.** Effect of soil nonlinearity on analysis of raft foundation. *Civil and Environmental Eng.*, 18(1): 292-300. Doi: 10.2478/cee-2022-0027
- Sales, M. M., Small, J. C., Poulos, H. G. 2010.** Compensated Piled Rafts in Clayey Soils- Behaviour, Measurements, and Predictions. *Can. Geotech. J.* 47: 327–345. Doi: 10.1139/T09-106.
- Sheil, B. B., McCabe B. A., Comodromos, E. M., Lehane, B. M. 2019.** Pile groups under axial loading: an appraisal of simplified non-linear prediction models. *Géotechnique*, 69(7): 565–579. Doi: 10.1680/jgeot.17.R.040
- Sinha, P., Wanare, R., Dalal, P., Iyer K.K.R. 2019.** An analytical parametric study on behaviour of flexible raft foundation. Proc. of the Indian Geotechnical Conference, pp. 365-374, India. DOI: 10.1007/978-981-33-6346-5_32.
- Tan, Y. C., Chow, C. M. 2004.** Design of piled raft foundation on soft ground. GSM-IEM Forum: The roles of engineering geology & geotechnical engineering in construction works, Malaya, Kuala Lumpur.
- Tomlinson, M., Woodward, J. 2014.** Pile Design and Construction Practice, 6th Edition, CRC Press Taylor & Francis, Florida, USA, 608 pp.



TCSC ve SSSC Cihazları Kullanılarak Enterkonnekte İletim Sisteminin Gerilim ve Yüklenme Parametrelerinin Kontrolü: Örnek Güç Sistemi Uygulaması

Control of Voltage and Loading Parameters of Interconnected Transmission System Using TCSC and SSSC Devices: An Example Power System Application

Umut Emre Uzun¹ , Nihat Pamuk^{1*} , Sezai Taşkın²

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

²Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

Öz

Aşırı yük altında çalışan enterkonnekte güç sistemlerinde artan enerji talebi ile farklı türde problemler oluşmaktadır. Olası bu tür problemlerin büyümesi ya da birkaç farklı problemin aynı anda meydana gelmesi ile enterkonnekte iletim sisteminin kararlılık yapısı bozulmaktadır. Bu problemlerin düzeltilmesi ve enterkonnekte güç sisteminin kararlılık yapısının artırılması amacıyla güç sistemlerine Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi cihazları (FACTS) bağlanmaktadır. Güç elektroniği elemanlarından meydana gelen FACTS cihazları hızlı ve otomatik tepki verme kabiliyetleri ile güç sisteminin yük taşıma kapasitesini ve kararlılık yapısını anlık olarak arttırmaktadır. Bu çalışmada örnek bir güç sistemi olarak 420 kV Kuzeybatı Anadolu (KBA) enterkonnekte güç sistemi incelenmiştir. İncelenen yüksek gerilim güç sisteminde hat kararlılık indeksleri yardımıyla en kritik enerji iletim hatları tespit edilmiştir. Enterkonnekte güç sisteminin gerilim kararlılık yapısının iyileştirilmesi amacıyla kritik durumdaki enerji iletim hatlarına FACTS cihazları, Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) ve Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC) bağlanmıştır. Çalışmanın sonunda ise, FACTS cihazlarının güç sistemindeki bara gerilim değerlerine, hat yüklenme parametresine, aktif ve reaktif güç kayıplarına olan etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kuzeybatı Anadolu enterkonnekte güç sistemi, FACTS cihazları, Gerilim kararlılığı, Hat kararlılık indeksleri

Abstract

Different problems occur with the increasing energy demand in interconnected power systems operating under overload. The stability of the interconnected transmission system deteriorates with the growth of such possible problems or the simultaneous occurrence of several different problems. To correct these problems and increase the stability of the interconnected power system, Flexible Alternating Current Transmission System devices (FACTS) are connected to the power systems. FACTS devices, which consist of power electronics elements, instantly increase the loading capacity and stability of the power system with their fast and automatic response capabilities. In this study, a 420 kV Northwest Anatolian (KBA) Interconnected power system is investigated as an example power system. The most critical energy transmission lines are determined with the help of line stability indices in the examined high-voltage power system. FACTS devices, Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), and Static Synchronous Series Capacitor (SSSC) are connected to the critical energy transmission lines to improve the voltage stability of the interconnected power system. At the end of the study, the effects of FACTS devices on bus voltage magnitudes, line loading parameter, active and reactive power losses in the power system are analyzed in detail.

Keywords: Northwest Anatolian interconnected power system, FACTS devices, Voltage stability, Line stability indices

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: nihatpamuk@gmail.com

Umut Emre Uzun orcid.org/0000-0002-6209-2962

Nihat Pamuk orcid.org/0000-0001-8980-6913

Sezai Taşkın orcid.org/0000-0002-2763-1625



1. Giriş

Günümüzde elektrik, vazgeçilmez bir enerji türüdür. Artan nüfus, gelişen teknoloji ve büyüyen sanayi ile elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmaktadır. Artan enerji talebinin karşılanması için yeni elektrik üretim tesisleri kurulmakta, üretilen enerjinin kayıpsız ve kaliteli bir şekilde tüketiciye ulaştırılması hedeflenmektedir (Tian vd. 2021). Üretilen elektrik enerji kilometrelerce uzunlukta olan enerji iletim hatları ile tüketicilere iletilmektedir. İletim sırasında güç kayıpları artmakta, enerji iletim hatlarının güç taşıma kapasitesi azalmakta ve güç sisteminin kararlılık yapısı bozulmaktadır (Haider vd. 2021). Bu sorunların önüne geçmek için güç sistemlerinde FACTS cihazları kullanılmaktadır. FACTS cihazlarının temel amacı, enerji iletim hatlarının güç taşıma kapasitesini arttırmak, bara gerilim değerlerini düzenlemek ve güç kayıplarını azaltmaktır (Biswas vd. 2021, Singh ve Agnihotri 2018). Güç sistemlerinde farklı yapıda pek çok FACTS cihazı kullanılmaktadır.

Bazı FACTS cihazları güç sistemlerindeki baralara paralel olarak bağlanarak bağlandıkları baraya akım enjekte ederken, bazı FACTS cihazları enerji iletim hatlarına seri olarak bağlanarak bağlandıkları enerji iletim hattına gerilim enjekte etmektedir (Zarkani vd. 2021). Literatür incelendiğinde paralel bağlanan FACTS cihazlarının optimal yerleşim yerinin tespiti için en sık kullanılan yöntem sürekli güç akışı analizi iken, seri bağlanan FACTS cihazlarının optimal yerleşim yerinin tespiti için genellikle hat kararlılık indeksleri kullanılmıştır (Akbar vd. 2021, Chandra vd. 2017, Nadeem vd. 2020, Taher vd. 2021).

Apribowa vd. (2019), 500 kV Java-Bali güç sistemini Power System Analysis Toolbox (PSAT) programında modellemişlerdir. Yapılan çalışmada, modellenen güç sisteminin gerilim kararlılığı sürekli güç akışı analizi ile incelenmiş ve analiz sonucuna göre gerilim değeri en düşük olan baraya SVC cihazı bağlanmıştır. SVC bağlantısı ile güç sisteminin yüklenme kapasitesinde ve bara gerilim profilinde iyileşmeler görülmüştür. Vaidya ve Chandrakar (2022), IEEE 57 baralı güç sistemini hem normal hem de aşırı yüklenme durumunda incelemişlerdir. Yapılan çalışmada sürekli güç akışı analizi ile güç sisteminin yüklenme kapasitesi ve bara gerilim değerleri hesaplanmış, gerilim değeri en düşük olan baraya paralel FACTS cihazlarından Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) bağlanmıştır. Güç sisteminin performansında hem normal hem de aşırı yüklenme durumunda STATCOM cihazının bağlanması ile iyileşmeler görülmüştür. Taher vd. (2022), IEEE 30 baralı güç sisteminin yüklenme kapasitesi arttırmak ve üretim maliyetini

azaltmak için FACTS cihazlarının bağlantı yerini ve kapasitesini tespit eden bir optimal güç akışı algoritması önermişlerdir. Çoklu amaç fonksiyonu içeren optimal güç akışı algoritmasında FACTS cihazlarının bağlantı yerini ve boyutunu tespit etmek için sürekli güç akışı analizinin entegre edildiği İyileştirilmiş Güve-Alev Optimizasyon (IMFO) algoritması kullanılmıştır. Analizler, yüklenme kapasitesi arttırmada, gerilim kararlılığını iyileştirmede, üretim maliyetini ve güç kayıplarını minimize etmede önerilen algoritma ile FACTS cihazları kullanımının güç sistemini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Ravikumar vd. (2020), IEEE 5 ve IEEE 6 baralı güç sistemlerinde hat kopması durumunu incelemişlerdir. Güç sistemlerindeki en kritik enerji iletim hattı Aktif Güç Performans İndeksi (APPI) ile belirlenmiş, bu hattın kopması durumunda TCSC cihazının bağlantı yeri Hat Gerilim Kararlılık İndeksi (LQP) ile tespit edilmiştir. TCSC cihazının bağlanması ile güç sistemlerinin bara gerilim değerlerinde ve güvenilirliğinde artış gözlenmiştir. Gupta vd. (2021), IEEE 14 baralı güç sisteminde her bir enerji iletim hattının kopma durumu incelemişlerdir. Çalışmada, kopması durumunda güç sistemi yüklenme kapasitesinin en fazla düşüş gösterdiği enerji iletim hatları sürekli güç akışı analizi ile tespit edilmiştir. Bu hatların kopması durumunda L_{min} , FVSI ve LQP hat kararlılık indeksleri kullanılarak güç sistemini iyileştirmek için kullanılacak SSSC cihazının optimal bağlantı yeri belirlenmiştir.

Bu çalışmada, KBA güç sisteminin 420 kV'luk kısmı PSAT programında modellenmiş ve hat kararlılık indekslerine göre en kritik durumdaki enerji iletim hattına TCSC ve SSSC cihazları bağlanmıştır (Pamuk 2009). Yapılan bağlantılar sonrasında bara gerilim değerlerinde, yüklenme parametresinde, aktif ve reaktif güç kayıplarında meydana gelen değişimler analiz edilmiştir. Daha önce analiz edilmemiş gerçek zamanlı bir güç sisteminin modellenmesi, çeşitli hat kararlılık indeksleri ile en kritik enerji iletim hatlarının tespiti ve seri FACTS cihazlarının karşılaştırılması ile literatüre katkı sağlanmıştır.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Sürekli Güç Akışı Analizi

Geleneksel Newton-Raphson güç akışı analizi, güç sistemlerinin bara gerilim değerlerini, her bir enerji iletim hattından geçen aktif ve reaktif güç değerlerini hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Ancak bu analiz yöntemi gerilim kararlılık sınırında çözümsüzdür. Bu nedenle gerilim kararlılığı analizi için kullanılamamaktadır (Karimi vd. 2019).

Sürekli güç akışı analizi, Newton-Raphson güç akış denklemlerine yüklenme parametresi olarak adlandırılan yeni bir değişkenin eklenmesi ile meydana gelmektedir. Yüklenme parametresi ile çözümsüzlük ortadan kaldırılmakta, güç sistemi farklı yük koşullarında incelenebilmekte ve gerilim kararlılık analizi yapılabilmektedir (Barua ve Quamruzzaman 2019).

Newton-Raphson güç akışı analizi ile n-baralı bir güç sisteminde i'inci baraya giren aktif ve reaktif güç denklemleri Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}),$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}),$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} \quad (2)$$

Eşitliklerde G ve L alt indisleri sırasıyla ilgili baradaki üretim ve yük değerlerini ifade etmek için kullanılmaktadır. Bu güç akışı denklemlerine yüklenme parametresi eklendiğinde Eşitlik 3 ve Eşitlik 4 meydana gelmektedir.

$$P_{Li} = P_{L_{i0}} (1 + \lambda) \quad (3)$$

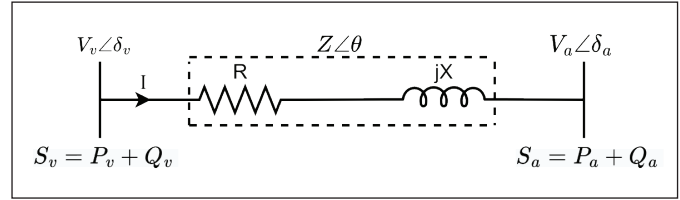
$$Q_{Li} = Q_{L_{i0}} (1 + \lambda) \quad (4)$$

Burada $P_{L_{i0}}$ ve $Q_{L_{i0}}$ temel durumdaki aktif ve reaktif yük miktarını, λ ise yüklenme parametresini ifade etmektedir. λ değerinin sürekli olarak değiştirilmesi ile farklı yüklenme durumunda güç sistemindeki her bir baranın aktif gücü ve bara gerilim değeri incelenmektedir (Barua ve Quamruzzaman 2019, Kobibi vd. 2022).

2.2. Hat Kararlılık Analizi

Hat kararlılık analizi güç sistemlerinde en kritik enerji iletim hattının tespiti için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde analiz için hat kararlılık indeksleri kullanılmaktadır. Literatürde pek çok hat kararlılık indeksi mevcuttur ve çoğu Şekil 1'de görülen 2 baralı bir güç sistemi referans alınarak türetilmiştir. Hat kararlılık indeksleri, enerji iletim hattı kararlı durumda iken 0 ile 1 arasında sonuç vermektedir. Enerji iletim hattının kararsız olduğu durumda ise sonuç 1'den büyük olmaktadır. Güç sistemlerinde tüm enerji iletim hatlarına uygulanan hat kararlılık indekslerinden en büyük değere sahip enerji iletim hattı en kritik hat olarak adlandırılmaktadır (Reis ve Barbosa 2006).

Şekil 1'de S, P, Q, V, δ, R, X sırasıyla görünür gücü, aktif gücü, reaktif gücü, bara gerilim genliğini, bara faz açısını,



Şekil 1. 2 baralı güç sistemi.

enerji iletim hattının rezistansını ve reaktansını ifade etmektedir. v ve a alt indisleri ise alıcı ve verici baraları tanımlamak için kullanılmıştır.

2.2.1 L_{mn} hat kararlılık indeksi

Eşitlik 5'te verilen hat kararlılık indeksinde bara gerilim büyüklüğü, bara faz açısı, reaktif güç, enerji iletim hattı reaktansı ve faz açısı kullanılmaktadır. Enerji iletim hattının kararlı olması için L_{mn} değerinin 1'den küçük olması gerekmektedir (Moghavvemi ve Omar 1998).

$$L_{mn} = \frac{4|X|Q_a}{(|V_v| \sin(\theta - \delta))^2} \leq 1 \quad (5)$$

2.2.2 FVSI hat kararlılık indeksi

Eşitlik 6'da verilen hat kararlılık indeksinde bara gerilim büyüklüğü, reaktif güç, enerji iletim hattı empedansı ve reaktansı kullanılmaktadır. Enerji iletim hattının kararlı olması için FVSI değerinin 1'den küçük olması gerekmektedir (Musirin ve Abdul Rahman 2002).

$$FVSI = \frac{4|Z|^2 Q_a}{|V_v|^2 |X|} \leq 1 \quad (6)$$

2.2.3 LQP hat kararlılık indeksi

Eşitlik 7'de verilen hat kararlılık indeksinde bara gerilim büyüklüğü, aktif güç, reaktif güç ve enerji iletim hattı reaktansı kullanılmaktadır. Enerji iletim hattının kararlı olması için LQP değerinin 1'den küçük olması gerekmektedir (Mohamed vd. 1998).

$$LQP = 4 \left| \frac{|X|}{|V_v|^2} \right| \left(Q_a + \frac{P_v^2 |X|}{|V_v|^2} \right) \leq 1 \quad (7)$$

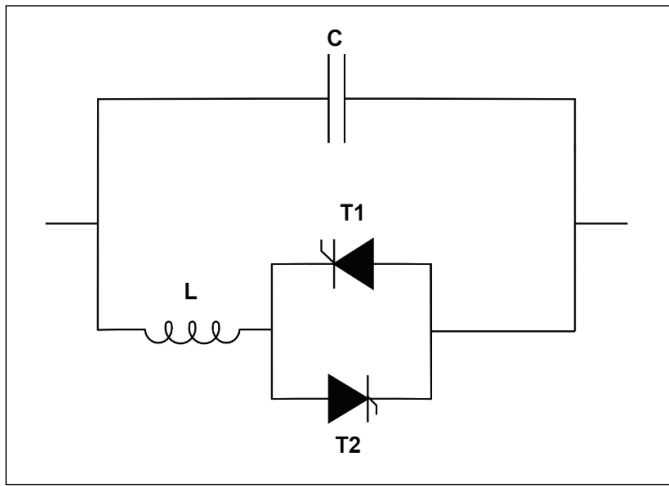
2.3. FACTS Cihazları

FACTS cihazları güç sistemlerinde kararlılığı sağlamak ve güç kalitesini arttırmak amacıyla kullanılan modern kompanzasyon sistemleridir. Geleneksel kompanzasyon sistemlerine kıyasla otomatik ve hızlı bir şekilde cevap verme kabiliyetine sahip olan FACTS cihazlarının temel amaçları güç akışını kontrol etmek ve güç iletim kapasitesini arttır-

maktır. FACTS cihazları bağlantı şekline göre seri, paralel ve seri-paralel FACTS cihazları olmak üzere 3 kısımda incelenmektedir. Seri FACTS cihazlarına Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) ve Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC), paralel FACTS cihazlarına Statik Var Kompanzator (SVC) ve Statik Senkron Kompanzator (STATCOM), seri-paralel FACTS cihazlarına ise Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC) örnek olarak verilebilmektedir (Siddique vd. 2019).

2.3.1 TCSC cihazı

TCSC cihazı enerji iletim hattına seri olarak bağlanan, bir kapasitör ve bu kapasitöre paralel bağlı Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)'den meydana gelmektedir. Şekil 2'de TCSC cihazının genel yapısı verilmiştir (Barua vd. 2021).



Şekil 2. TCSC cihazının genel yapısı.

Değişken reaktansa sahip olan TCSC cihazı tristörün tetikleme açısı (α) ile ayarlanabilmektedir. Tetikleme açısı 90 derece ile 140 derece arasında iken değişken reaktans endüktif, 145 ile 180 derece arasında iken ise kapasitif durumdadır. Değişken reaktans ile tetikleme açısı arasındaki karakteristik Şekil 3'te verilmiştir (Taha vd. 2021).

2.3.2 SSSC cihazı

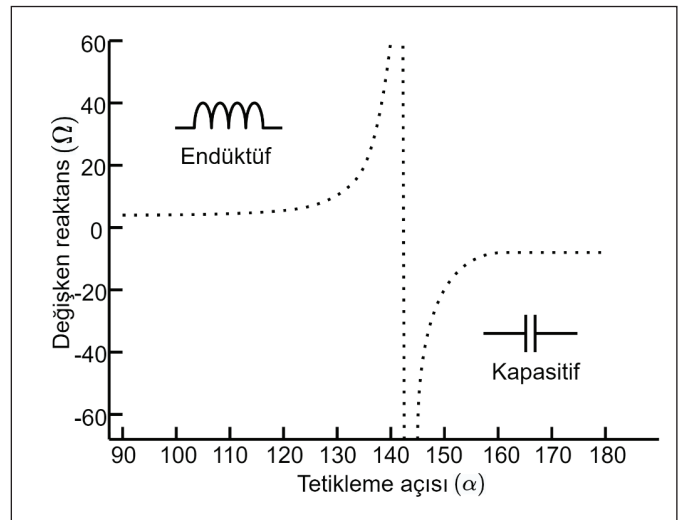
SSSC cihazı enerji iletim hattına seri olarak bağlanan senkron gerilim kaynağından oluşmaktadır. Bu gerilim kaynağı enerji iletim hattına uygun fazda gerilim enjekte etmekte ve hattın empedansını değiştirmektedir. Şekil 4'te SSSC cihazının genel yapısı verilmiştir (Khan vd. 2021).

SSSC cihazı, enerji iletim hattı ile aktif ve reaktif güç alışverişi yapabilmektedir. Cihaz tarafından enjekte edilen gerilim ile enerji iletim hattından akan akım aynı fazda olduğu

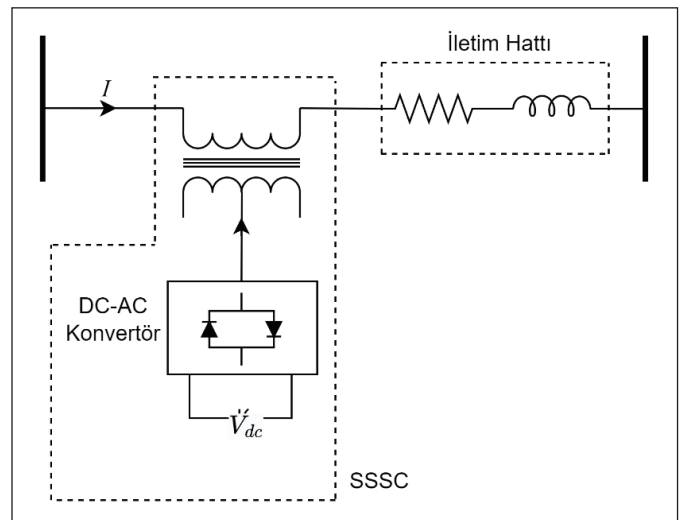
durumda aktif güç alışverişi, enjekte edilen gerilim ile enerji iletim hattından akan akım arasında 90 derece faz farkı olduğu durumda ise reaktif güç alışverişi yapılmaktadır. SSSC cihazının çalışma prensibi Şekil 5'te gösterilmiştir.

3. Bulgular

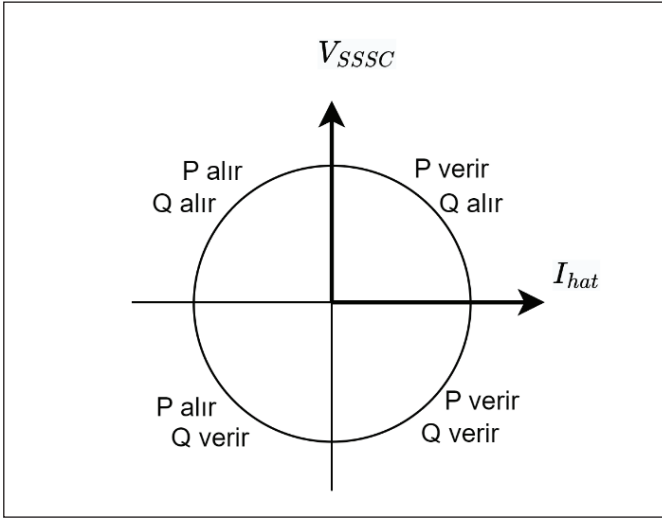
Bu çalışmada KBA güç sisteminin 420 kV'luk kısmı modellenmiş ve gerilim kararlılığı bakımından incelenmiştir. Yapılan incelemelerde güç sistemi ilk olarak temel durumda analiz edilmiştir. Daha sonra güç sistemine hat kararlılık indekslerine göre TCSC ve SSSC cihazları eklenerek analizler tekrarlanmıştır. Son olarak, eklenen FACTS cihazlarının güç sistemine etkisi karşılaştırılmıştır. Çalışmaya ait akış diyagramı Şekil 6'da verilmiştir.



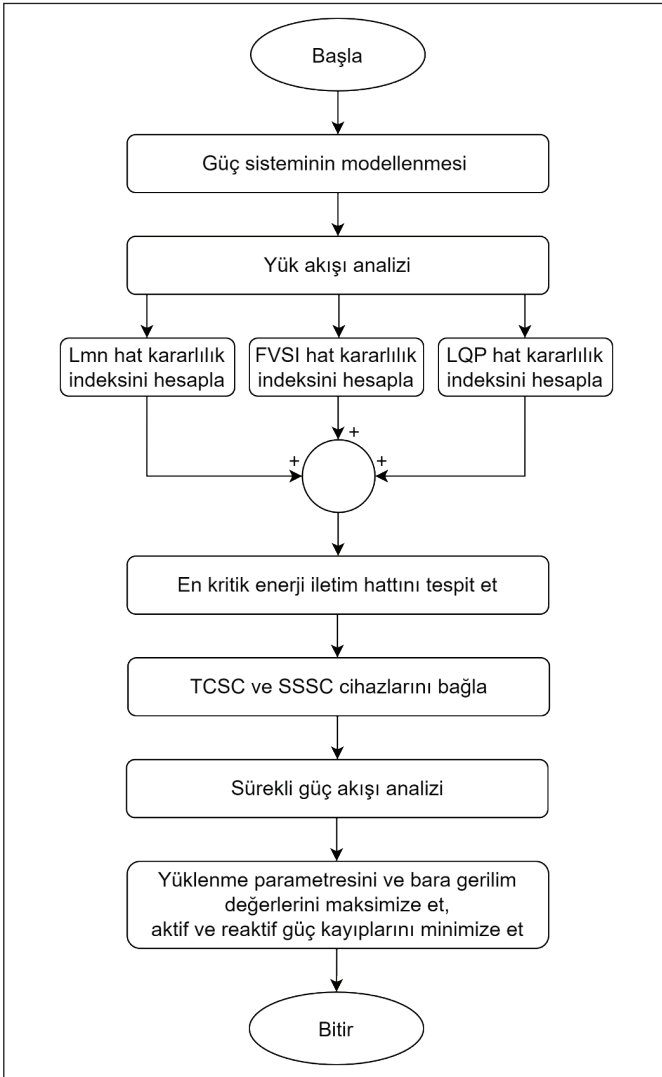
Şekil 3. TCSC cihazı çalışma karakteristiği.



Şekil 4. SSSC cihazının genel yapısı.



Şekil 5. SSSC cihazı çalışma karakteristiği.



Şekil 6. Çalışmaya ait akış diyagramı.

3.1. Kuzeybatı Anadolu (KBA) Güç Sisteminin Modellenmesi

KBA güç sisteminin 420 kV'luk kısmı 1 salınım barası, 4 üretim barası ve 7 yük barası olmak üzere toplam 12 baradan ve 16 iletim hattından meydana gelmektedir. Bu güç sistemine ait iletim hattı parametreleri Ek 1'de verilmiştir. PSAT araç kutusu ile modellenen güç sistemi Şekil 7'de görülmektedir.

3.2. Kuzeybatı Anadolu Güç Sistemi Temel Durum Analizi

Güç sistemlerinde herhangi bir müdahalenin olmadığı durum, temel durum olarak ifade edilmektedir. Sürekli güç akışı analizine göre temel durumdaki KBA güç sisteminin bara gerilim değerleri Şekil 8A'da gösterilmiştir. Sürekli güç akışı analizine göre gerilim değeri en düşük olan 3 bara sırasıyla Ümraniye, Tepeören ve Paşaköy baralarıdır. Bu baralara ait λ -V eğrisi Şekil 8B'de verilmiştir.

Çizelge 1'de ise temel durumdaki KBA güç sistemine ait genel analiz sonuçları yer almaktadır.

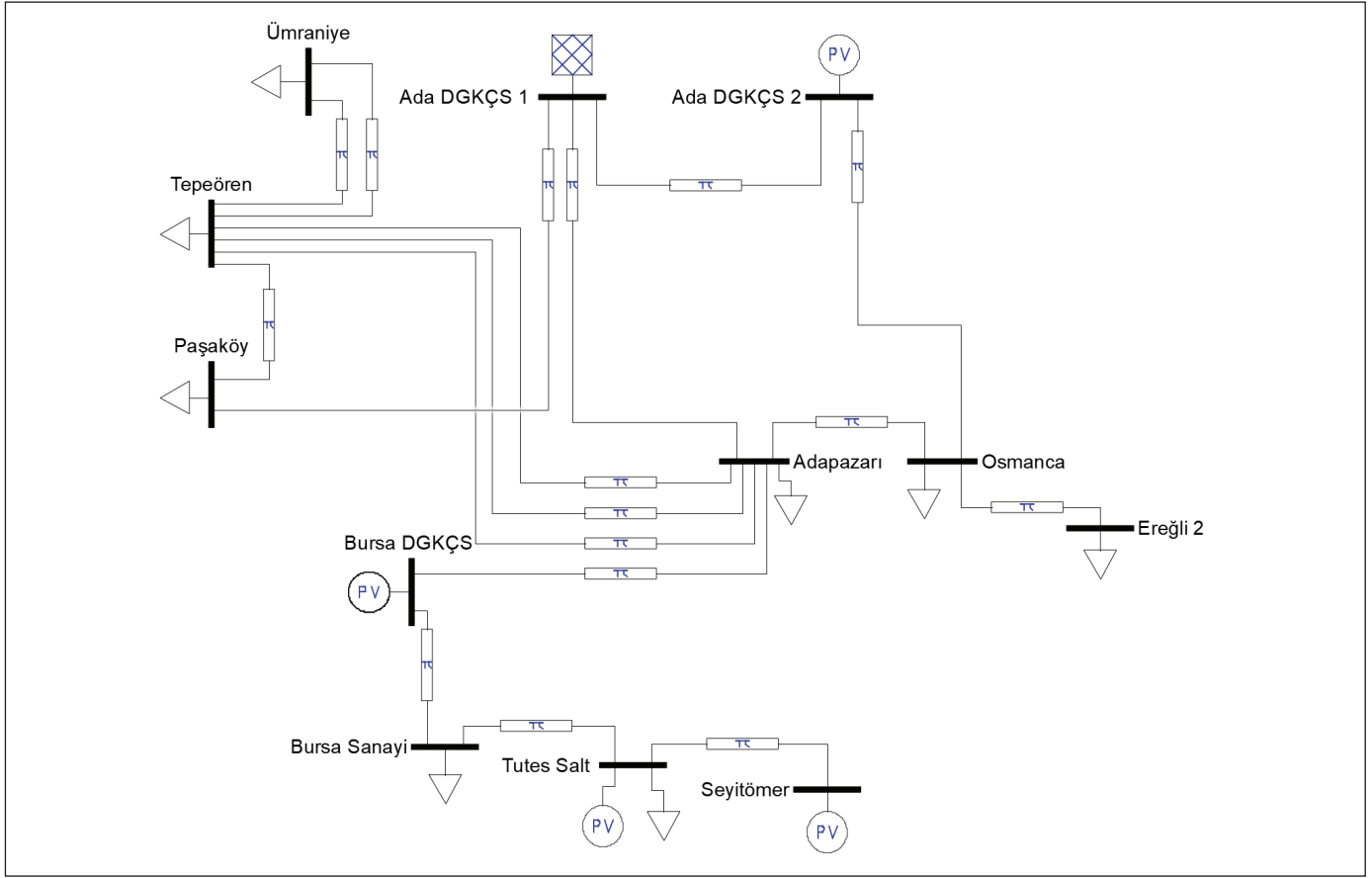
Çizelge 1. Temel durumdaki KBA güç sisteminin bara gerilim değerleri, güç kayıpları ve yüklenme parametresi.

Bara gerilim değerleri	
Ortalama bara gerilim değeri	En düşük bara gerilim değeri
0.86242 p.u.	Ümraniye = 0.57184 p.u.
Kayıplar	
Aktif Güç Kaybı	Reaktif Güç Kaybı
10.06572 p.u.	99.56205 p.u.
Yüklenme Parametresi	
4.436	

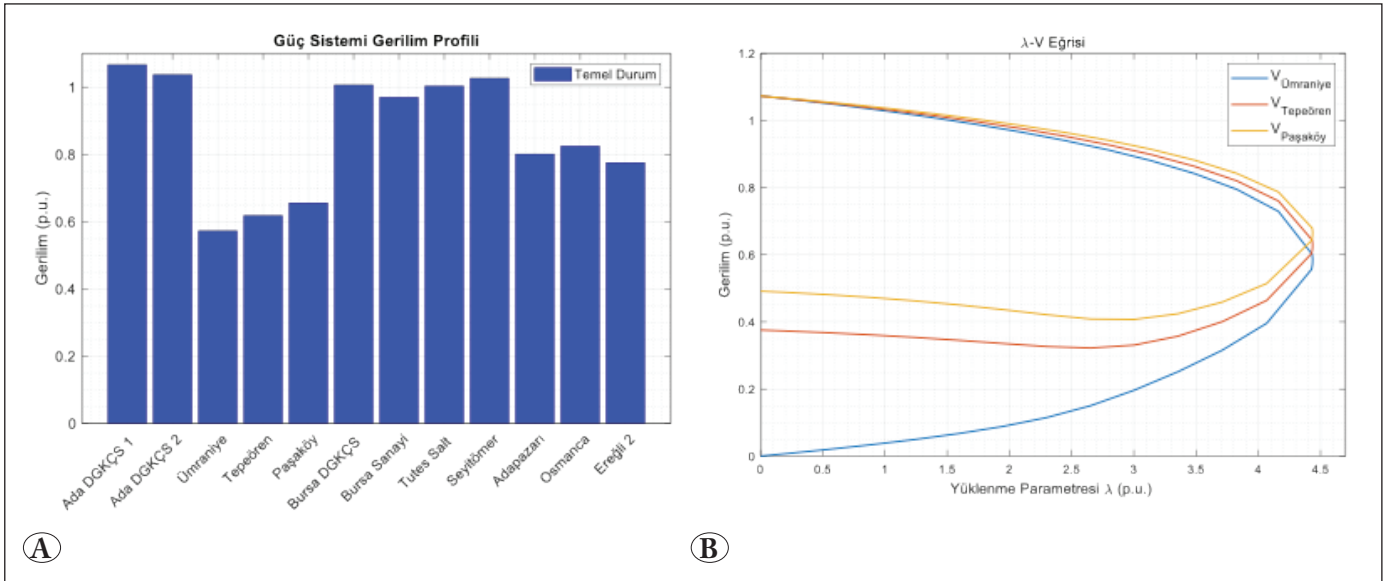
3.3. Kuzeybatı Anadolu Güç Sistemi Hat Kararlılık Analizi

Güç sisteminde seri FACTS cihazlarını en uygun yere yerleştirmek için hat kararlılık indeksleri kullanılmıştır. Uygulanan L_{mn} , FVSI ve LQP hat kararlılık indekslerine ait analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Tüm hat kararlılık indekslerine göre Bursa DGKÇS ve Adapazarı baraları arasında yer alan 3 numaralı enerji iletim hattı en kritik enerji iletim hattıdır. Bu enerji iletim hattına TCSC ve SSSC cihazları bağlanarak analizler tekrarlanmıştır.



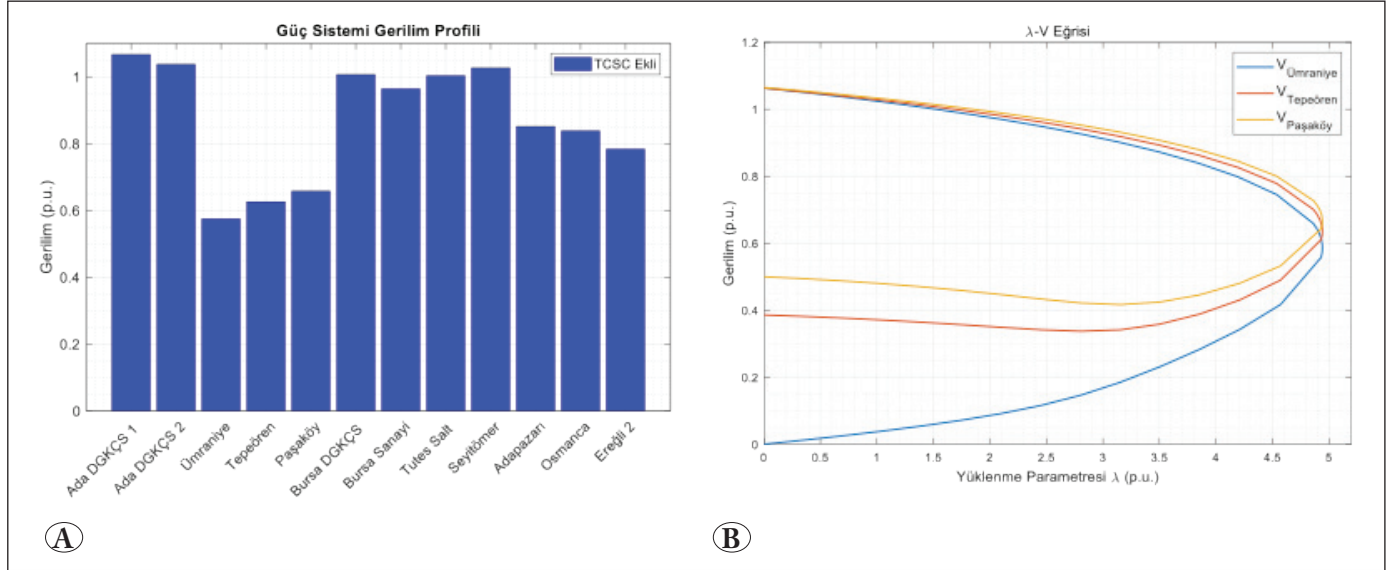
Şekil 7. 420 kV KBA güç sisteminin PSAT modeli.



Şekil 8. KBA güç sisteminin temel durumda; (A) bara gerilim profili, (B) λ- V eğrisi

Çizelge 2. KBA güç sisteminin hat kararlılık indeksi sonuçları

Hat No	L_{mn}	Hat No	FVSI	Hat No	LQP
3	0.188751	3	0.190302	3	0.281853
6	0.108785	6	0.108836	5	0.121383
5	0.108099	5	0.106809	6	0.107991
16	0.083421	16	0.082979	16	0.084298
8	0.07849	8	0.078072	8	0.079468
12	0.068129	12	0.068118	12	0.067328
2	0.039337	2	0.039136	2	0.041568
11	0.032243	11	0.031947	11	0.038959
13	0.030363	14	0.03015	13	0.036947
14	0.030072	13	0.030031	7	0.035103
7	0.028479	7	0.028167	14	0.030361
10	0.027512	10	0.027448	10	0.027579
4	0.015145	4	0.015135	4	0.015076
15	0.014419	15	0.014116	1	0.013892
1	0.013511	1	0.013475	9	0.013892
9	0.013511	9	0.013475	15	0.007025



Şekil 9. KBA güç sistemine TCSC eklendiği durumda; (A) bara gerilim profili, (B) λ - V eğrisi.

3.4. Kuzeybatı Anadolu Güç Sistemine TCSC Cihazının Etkisi

En kritik enerji iletim hattı olan 3 numaralı enerji iletim hattına TCSC cihazı bağlanmış ve tekrarlanan sürekli güç akışı analizine göre güç sisteminin bara gerilim değerleri Şekil 9A'da gösterilmiştir. Sürekli güç akışı analizine göre

gerilim değeri en düşük olan 3 bara sırasıyla Ümraniye, Tepeören ve Paşaköy baralarıdır. Bu baralara ait λ -V eğrisi Şekil 9B'de verilmiştir.

Çizelge 3'te ise TCSC cihazı eklenen KBA güç sistemine ait genel analiz sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 3. TCSC cihazı ekli KBA güç sisteminin bara gerilim değerleri, güç kayıpları ve yüklenme parametresi

Bara gerilim değerleri	
Ortalama bara gerilim değeri	En düşük bara gerilim değeri
0.8690 p.u.	Ümraniye = 0.57426 p.u.
Kayıplar	
Aktif Güç Kaybı	Reaktif Güç Kaybı
7.76120 p.u.	89.64424 p.u.
Yüklenme Parametresi	
4.9412	

Temel durum ile TCSC cihazının ekli olduğu durum karşılaştırıldığında, bara gerilim değerlerinin ve yüklenme parametresinin arttığı, aktif ve reaktif güç kayıplarının ise azaldığı görülmüştür.

3.5. Kuzeybatı Anadolu Güç Sistemine SSSC Cihazının Etkisi

En kritik enerji iletim hattı olan 3 numaralı enerji iletim hattına SSSC cihazı bağlanmış ve tekrarlanan sürekli güç akışı analizine göre güç sisteminin bara gerilim değerleri Şekil 10A'da gösterilmiştir. Sürekli güç akışı analizine göre gerilim değeri en düşük olan 3 bara sırasıyla Ümraniye, Tepeören ve Paşaköy baralarıdır. Bu baralara ait λ -V eğrisi Şekil 10B'de verilmiştir.

Çizelge 4'te ise SSSC cihazı eklenen KBA güç sistemine ait genel analiz sonuçları yer almaktadır.

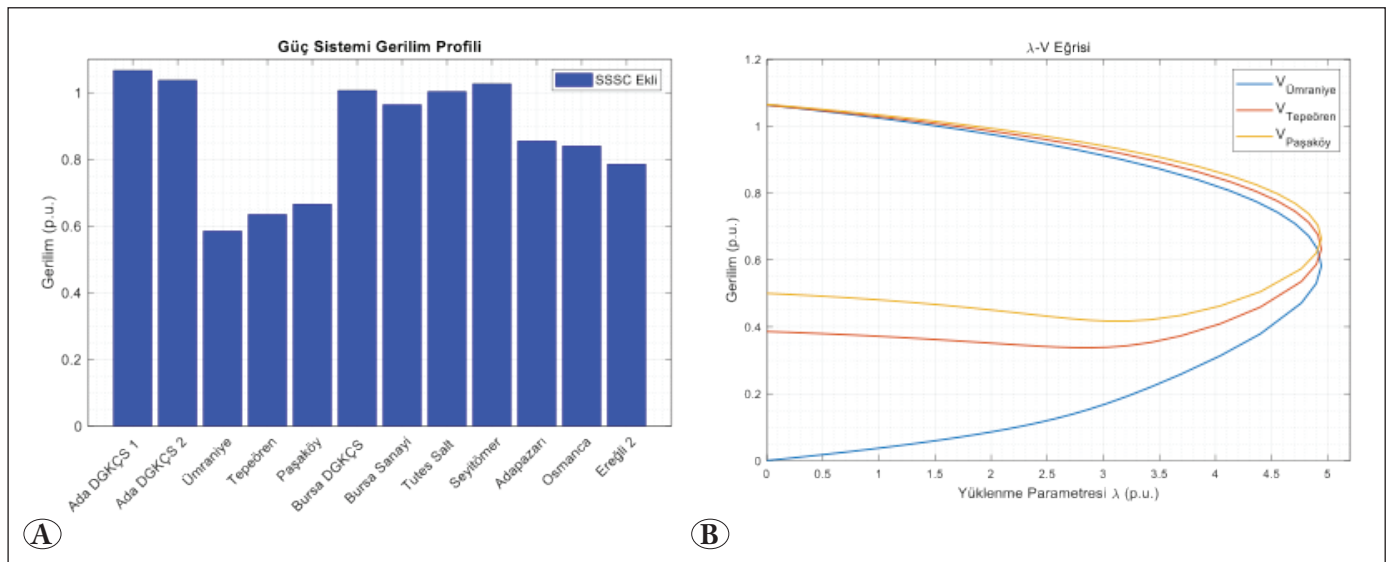
Çizelge 4. SSSC cihazı ekli KBA güç sisteminin bara gerilim değerleri, güç kayıpları ve yüklenme parametresi

Bara gerilim değerleri	
Ortalama bara gerilim değeri	En düşük bara gerilim değeri
0.87184 p.u.	Ümraniye = 0.58415 p.u.
Kayıplar	
Aktif Güç Kaybı	Reaktif Güç Kaybı
7.60345 p.u.	87.77712 p.u.
Yüklenme Parametresi	
4.9415	

Temel durum ile SSSC cihazının ekli olduğu durum karşılaştırıldığında, bara gerilim değerlerinin ve yüklenme parametresinin arttığı, aktif ve reaktif güç kayıplarının ise azaldığı görülmüştür.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada KBA güç sistemi PSAT araç kutusu kullanılarak modellenmiş ve gerilim kararlılığı bakımından incelenmiştir. Kararlılığın iyileştirilmesi için güç sistemine seri FACTS cihazları bağlanmıştır. Güç sistemine bağlanacak olan TCSC ve SSSC cihazlarının optimal yerleşim yerleri farklı hat kararlılık indeksleri kullanılarak tespit edilmiştir. Yapılan bağlantılar ile bara gerilim değerlerinde, yüklenme parametresinde, aktif ve reaktif güç kaybında meydana gelen değişimler Çizelge 5'te özetlenmiştir.



Şekil 10. KBA güç sistemine SSSC eklendiği durumda; (A) bara gerilim profili, (B) λ -V eğrisi.

Çizelge 5. Tüm durumlarda KBA güç sisteminin bara gerilim değerleri, güç kayıpları ve yüklenme parametresi.

	Ortalama bara gerilim değeri (p.u.)	En düşük bara gerilim değeri (p.u.)	Aktif Güç Kaybı (p.u.)	Reaktif Güç Kaybı (p.u.)	Yüklenme Parametresi
Temel Durum (FACTS yok)	0.86242	0.57184	10.06572	99.56205	4.436
TCSC ekli	0.86900 (% 0.76 artış)	0.57426 (% 0.42 artış)	7.76120 (% 22.89 azalış)	89.64424 (% 9.96 azalış)	4.9412 (% 11.39 artış)
SSSC ekli	0.87184 (% 1.09 artış)	0.58415 (% 2.15 artış)	7.60345 (% 24.46 azalış)	87.77712 (% 11.84 azalış)	4.9415 (% 11.40 artış)

İncelemeler sonucunda her iki FACTS cihazının da iletim hattının yük taşıma kapasitesini arttırdığı, bara gerilim değerlerini iyileştirdiği, aktif ve reaktif güç kayıplarını ise azalttığı görülmektedir. Kullanılan FACTS cihazları karşılaştırıldığında; SSSC cihazının ortalama bara gerilim değerini % 1.09, en düşük bara gerilim değerini % 2.15, yüklenme parametresini % 11.40 arttırması, aktif güç kaybını % 24.46, reaktif güç kaybını ise % 11.84 azaltması sonucunda TCSC cihazına kıyasla güç sistem performansını iyileştirmede daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Gelecek çalışmalarda KBA güç sisteminin tamamı modellenerek kararlılık bakımından incelenmesi, seri FACTS cihazlarına ek olarak paralel FACTS cihazlarının da güç sistemine bağlanarak karşılaştırılması ve FACTS cihazlarının optimal yerleşim yeri ve kapasitesinin tespiti için çeşitli optimizasyon algoritmalarının kullanılması hedeflenmektedir.

5. Kaynaklar

- Akbar, R., Sara, I. D., Suriadi. 2021.** Analysis of UPFC Installation Effect on Power Flow in the 150 kV Aceh Transmission System. *International Conference on Computer System, Information Technology, and Electrical Engineering, COSITE*, 35–40. <https://doi.org/10.1109/COSITE52651.2021.9649452>
- Apribowa, C. H. B., Listiyanto, O., Ibrahim, M. H. 2019.** Placement Static Var Compensator (SVC) for Improving Voltage Stability Based on Sensitivity Analysis : A Case Study Of 500 KV Java-Bali Electrical Power System. *6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, 276–280. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF48524.2019.9102590>
- Barua, P., Barua, R., Quamruzzaman, M., Rabbani, M. G. 2021.** Small Signal Stability and Transient Stability improvement of Bangladesh Power System using TCSC, SVC and TCSC, STATCOM based Series Shunt Compensator. *International Conference on Science and Contemporary Technologies, ICSCCT*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSCCT53883.2021.9642636>

- Barua, P., Quamruzzaman, M. 2019.** Steady state voltage vulnerability and stability limit analysis of Bangladesh power system using STATCOM as a shunt compensator. *4th International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, ICEEICT*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CEEICT.2018.8628122>
- Biswas, P. P., Arora, P., Mallipeddi, R., Suganthan, P. N., Panigrahi, B. K. 2021.** Optimal placement and sizing of FACTS devices for optimal power flow in a wind power integrated electrical network. *Neural Computing and Applications*, 33(12): 6753–6774. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05453-x>
- Chandra, A., Pradhan, A. K., Sinha, A. K. 2017.** A Comparative Study of Voltage Stability Indices Used for Power System Operation. *International Conference on 21st Century Energy Needs - Materials, Systems and Applications, ICTFCEN*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICTFCEN.2016.8052703>
- Gupta, S. K., Mallik, S. K., Tripathi, J. M., Sahu, P. 2021.** Comparison of Voltage Stability Index with Optimal Placement of SSSC Considering Maximum Loadability. *International Symposium of Asian Control Association on Intelligent Robotics and Industrial Automation, IRIA*, 101–106. <https://doi.org/10.1109/IRIA53009.2021.9588759>
- Haider, W., Ul Hassan, S. J., Mehdi, A., Hussain, A., Adjayeng, G. O. M., Kim, C. H. 2021.** Voltage profile enhancement and loss minimization using optimal placement and sizing of distributed generation in reconfigured network. *Machines*, 9(1): 1–16. <https://doi.org/10.3390/machines9010020>
- Karimi, M., Shahriari, A., Aghamohammadi, M. R., Marzooghi, H., Terzija, V. 2019.** Application of Newton-based load flow methods for determining steady-state condition of well and ill-conditioned power systems: A review. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 113: 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.055>

- Khan, N. H., Wang, Y., Tian, D., Jamal, R., Kamel, S., Ebeed, M. 2021.** Optimal siting and sizing of SSSC using modified salp swarm algorithm considering optimal reactive power dispatch problem. *IEEE Access*, 9: 49249–49266. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061503>
- Kobibi, Y. I. D., Djehaf, M. A., Khatir, M., Ouadafraksou, M. 2022.** Continuation Power Flow Analysis of Power System Voltage Stability with Unified Power Flow Controller, *J. Intell Syst. Control*. <https://doi.org/10.56578/jisc010106>
- Moghavvemi, M., Omar, F.M. 1998.** Technique for Contingency Monitoring and Voltage Collapse Prediction. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 145(6): 634–640. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19982355>
- Mohamed, A., Jasmon, G. B., Yusof, S. 1998.** A Static Voltage Collapse Indicator Using Line Stability Factors. *Journal of Industrial Technology*, 7(1): 73–85.
- Musirin, I., Abdul Rahman, T. K. 2002.** Novel Fast Voltage Stability Index (FVSI) for Voltage Stability Analysis in Power Transmission System. *Student Conference on Research and Development: Globalizing Research and Development in Electrical and Electronics Engineering, SCORED*, 265–268. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2002.1033108>
- Nadeem, M., Imran, K., Khattak, A., Ulasayar, A., Pal, A., Zeb, M. Z., Padhee, M. 2020.** Optimal placement, sizing and coordination of FACTS devices in transmission network using whale optimization algorithm. *Energies*, 13(3): 1–24. <https://doi.org/10.3390/en13030753>
- Pamuk, N. 2009.** 380 ve 154 kV'luk Kuzeybatı Anadolu Şebekesi Güç Akışı Benzetimleri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 109s.
- Ravikumar, S., Upadhyay, P., Upadhyay, B. 2020.** Line Stability Index-Based Voltage Stability Assessment Placing Series Compensation of TCSC. *Learning and Analytics in Intelligent Systems*, 57–67.
- Reis, C., Maciel Barbosa, F. P. 2006.** A comparison of voltage stability indices. *Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON*, 1007–1010. <https://doi.org/10.1109/melcon.2006.1653269>
- Siddique, A., Xu, Y., Aslam, W., Rasheed, M. 2019.** A Comprehensive Study on FACTS Devices to Improve the Stability and Power Flow Capability in Power System. *Asia Power and Energy Engineering Conference, APEEC*, 199–205. <https://doi.org/10.1109/APEEC.2019.8720685>
- Singh, N., Agnihotri, P. 2018.** Power System Stability Improvement Using FACTS Devices. *International Journal of Advance Research and Development*, 4(3): 171–176.
- Taha, I. B. M., ELGebaly, A. E., Ahmed, E. S., Abd el-Ghany, H. A. 2021.** Generalized voltage estimation of TCSC-compensated transmission lines for adaptive distance protection. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 130:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107018>
- Taher, A. Kamel, S., Jurado, F., Yu, J. 2022.** Optimal Locations and Sizes of Shunt FACT Devices for Enhancing Power System Loadability Using Improved Moth Flame Optimization. *Electric Power Components and Systems*, 49(20): 1536–1554. <https://doi.org/10.1080/15325008.2022.2134512>
- Taher, M. A., Kamel, S., Jurado, F. 2021.** Maximizing Power System Loadability Based on Optimal Allocation of SVC and STATCOM. *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/CHILECON54041.2021.9703037>
- Tian, J., Li, K., Xue, W. 2021.** An adaptive ensemble predictive strategy for multiple scale electrical energy usages forecasting. *Sustainable Cities and Society*, 66:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102654>
- Vaidya, P., Chandrakar, V. K. 2022.** Congestion Management of Large Power Network with Static Synchronous Compensator. *Journal of Intelligent Systems and Control*, 1(1): 60–67. <https://doi.org/10.1109/CONIT55038.2022.9848176>
- Zarkani, M. K., Tukkee, A. S., Alali, M. J. 2021.** Optimal placement of facts devices to reduce power system losses using evolutionary algorithm. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(3): 1271–1278. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v21.i3.pp1271-127>

EKLER

Ek 1. KBA güç sistemi iletim hattı parametreleri.

Hat No	Baralar		Resistans (p.u.)	Reaktans (p.u.)	Süseptans (p.u.)
1	Tepeören	Ümraniye	0.000769	0.007119	0.15741
2	Osmanca	Ada DGKÇS 2	0.001187	0.013633	0.447872
3	Bursa DGKÇS	Adapazarı	0.003374	0.031179	0.692429
4	Tepeören	Paşaköy	0.000331	0.003807	0.125077
5	Paşaköy	Ada DGKÇS 1	0.001274	0.019048	0.65504
6	Ada DGKÇS 2	Ada DGKÇS 1	0.000013	0.000147	0.004842
7	Adapazarı	Tepeören	0.001979	0.018287	0.406122
8	Adapazarı	Ada DGKÇS 1	0.000469	0.004334	0.096258
9	Tepeören	Ümraniye	0.000769	0.007119	0.15741
10	Ereğli 2	Osmanca	0.001174	0.010699	0.249531
11	Adapazarı	Tepeören	0.001321	0.015177	0.498591
12	Adapazarı	Osmanca	0.001631	0.014856	0.346473
13	Adapazarı	Tepeören	0.002097	0.019424	0.429504
14	Bursa DGKÇS	Bursa Sanayi	0.000389	0.003592	0.079781
15	Bursa Sanayi	Tutes Salt	0.002112	0.019471	0.443313
16	Tutes Salt	Seyitömer	0.00101	0.009314	0.212059



Bitüm Modifikasyonda Atık Halı, Stiren Etilen Bütadien Stiren ve Elvaloy RET Kullanılarak Fiziksel Özelliklerin Geliştirilmesi

Improvement of Physical Properties by Using Waste Carpet, Styrene Ethylene Butadiene Styrene and Elvaloy RET in Bitumen Modification

Pelin Akgül Bayraktaroğlu , Seyfullah Keyf* 

Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa Kampüsü, Esenler, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmada TUPRAŞ 50/70 penetrasyonlu orijinal bitüm modifiyesi için reaktif elastomerik terpolimer (Elvaloy RET) ve SEBS, atık halı polimerleri kullanılmıştır. Yumuşama noktası ve penetrasyon değeri polimer modifiye bitümün fiziksel özellikler geliştirilmesinde öncelikli parametrelerdir. 50/70 penetrasyonlu orijinal bitüm modifiye edildikten sonra, yumuşama noktası ve viskozitesi değerinin arttığı, penetrasyon değerinin ise azaldığı belirlenmiştir. Çalışmada geliştirilen polimer modifiye bitüm (CPMB); Türkiye Karayolları Polimer Modifiye Bitüm (TPMB) şartnamesinde yumuşama noktası ve penetrasyon değerlerine göre tanımlanmış 8 farklı polimer modifiye bitüm ile karşılaştırılmıştır. Polimer modifiye bitümün artımlı bileşimlerini (SEBS, atık halı ve Elvaloy RET) içeren 7. saatteki 15 numunenin tamamının penetrasyon değerlerinin, TPMB şartnamesinde tanımlı polimer modifiye bitüm değerlerinden yedi tanesini ve sekiz yumuşama noktası değerinin tamamını sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer modifiye bitüm, Penetrasyon, Yumuşama noktası, Viskozite

Abstract

In this study, reactive elastomeric terpolymer (Elvaloy RET) and SEBS, waste carpet polymers were used for the modification of original TUPRAŞ 50/70 penetration bitumen. Softening point and the penetration value are the primary parameters in the development of the physical properties of the polymer modified bitumen. After the 50/70 penetration original bitumen was modified, softening point and viscosity values were determined to increase whereas the penetration value was determined to decrease. Polymer modified bitumen (CPMB) developed in the present study was compared with 8 different polymer modified bitumen defined according to the softening point and penetration values indicated in the Turkish Highways Polymer Modified Bitumen (TPMB) specification. It was determined that the penetration values at the 7 th hour of all 15 samples containing the incremental compositions of polymer modified bitumen (SEBS, waste carpet and Elvaloy RET) of the present study provided seven of the polymer modified bitumen values and all eight softening point values in the TPMB specification.

Keywords: Polymer modified bitumen, Penetration, Softening point, Viscosity

1. Giriş


Trafik yoğunluğunun aşırı artmasıyla birlikte; ağır vasıtaların fazlalığı, yeni aks tasarımları ve lastiklerin basınçları dikate alındığında karayollarının uzun süre dayanıklılığı için asfaltın mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesini zorunlu

kılmaktadır. Bitüm modifiyesinde kullanılan polimerler, kimyasal yapıları ve özelliklerine göre temel olarak üç ana gruba ayrılır: elastomer, plastomer ve reaktif polimer (Zhu vd. 2014).

Genel olarak polimerler, (1) disperse , (2) reaksiyona girmiş sistemler olarak görülebilir. Disperse sistemler en yaygın olanları olmakla birlikte (EVA, neopren, SEBS: stiren etilen bütadien stiren, SBR ve PE: polietilen), polimerlerden bazıları bir polimer ağı oluşturur, ancak bitümden ayrı bir faz oluşturdukları zaman içinde tespit edildi (Yıldırım 2007). Dispers sistemlerin aksine, reaksiyona giren polimerler o kadar yaygın değildir (Elvaloy® 4170) ancak polimer ile as-

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: keyf@yildiz.edu.tr

Pelin Akgül Bayraktaroğlu  orcid.org/0000-0003-0299-8671

Seyfullah Keyf  orcid.org/0000-0001-8846-0674



falt çimentosu arasında kimyasal bir reaksiyonun meydana gelmesi ile karakterize edilir (Witczak vd. 1995).

Polimer modifiye bitümde önemi gittikçe artan reaktif polimer Elvaloy RET polimerleri tipik olarak etilen, glisidilmetakrilat (GMA) ve metil, etil veya butil akrilat gibi bir ester grubunu içerir. RET'nin benzersiz bir özelliği, moleküller arasında kovalent bağlar kurarak bir bitümdeki reaktif bileşene kimyasal olarak bağlanmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda elastik özelliğini artırır (Jasso vd. 2015). RET polimerleri düşük yüzdelere (ağırlıkça %1.5-2.5 arasında) kullanılır, çünkü daha yüksek bileşimde çözünmeyen ve erimeyen bir asfalt ağı oluşumuna yol açar (Harold vd. 1995). Bulatović et al. reaktif fonksiyonel grupların (GMA'lar) farklı yüzdelere içeren RET polimerleri ile modifiye edilen bitümler elde edilir. Ağırlıkça %1.9 RET kullanımı; asfalt ağı oluşum sınır değeri (asfalt karışımının akışkanlık viskozitesi) şartlarında bitüm elastikiyeti ve tekerlek izi direnci değerleri dikkate alınır (Bulatovic vd. 2014).

Luo ve arkadaşları bitüme EVA ve EVA-g-MAH polimerlerini katarak polimer modifiye bitüm elde etmişlerdir. EVA-g-MAH ile modifiye edilen bitümün düşük ısı duyarlılığı olduğunu ve kalıcı deformasyona dayanıklılığı arttığını belirtmişlerdir (Luo vd. 2011).

Metli; %2, %3, %4, %5 ve %6 oranlarda ağırlıkça SBS bazlı polimerle saf bitümü modifiye etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, SBS ilavesi bitümün viskozitesini ve yapışkanlığını, yük altında dayanımını, yüksek sıcaklığa dayanıklılığını ve yaşlanmaya karşı direncini artırarak bitümün mühendislik özelliklerinin iyileştirdiğini belirtmiştir (Metli 2007).

Polimer modifiye bitümde adhezyon özelliğini geliştirmek için, Kütlice %2'lik epoksi reçinesi bitüm kıvamlılığını artırıp, adhezyon özelliğini geliştirip, çatlak ve soyulma direncinin arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca kütlice %2'lik fenolformaldehit ilavesi, epoksi reçine ilavesiyle benzer sonuçlar vermiştir (Çubuk 2007).

Saf bitümün RET modifikasyonunun yüksek sıcaklık özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir, orta ve düşük sıcaklık özelliklerinin ise temel bitüme benzerlik gösterir. RET'in modifikasyonu, yorulma direncini artırır, yaşlanma direncini geliştirir (Holleran vd. 2022). Farklı elastomer olarak Stiren-etilen-bütadien-stiren kopolimer (SEBS) saf bitümün fiziksel özelliklerindeki geliştirmek için ortaya çıkmıştır. Bitümün yaşlanması, asfalt kaplamaların dayanıklılığının azalmasının önemli bir nedenidir. Bu nedenle, malzemenin dayanıklılığını artırmak için polimer modifiye bitümlerde tercih edilir. SEBS polimerinin kullanımının, fiziksel

ve reolojik özellikleri üzerindeki yaşlanma etkisini azalttığı bilinmektedir (Djaffar vd. 2016). Stiren-etilen-bütadien-stiren kopolimer (SEBS)/organ-montmorillonit (OMMT) modifiye asfaltın fiziksel özellikleri; SEBS'nin hem yüksek hem de düşük sıcaklık performansını önemli ölçüde arttıracak olduğu, ancak SEBS ve asfalt arasındaki zayıf uyum nedeniyle, modifiye asfaltın sıcak depolanması sırasında ciddi faz ayrımı istenmeyen durum olarak gerçekleşir (Yunbin vd. 2022).

Son zamanlarda literatürde polimer modifiye bitüm çalışmalarında özellikle elvaloy RET'in önemi artmaktadır. Bu çalışmamızda, SEBS elastomer, atık halı (ATH) plastomer, Elvaloy RET reaktif terpolimer olmak üzere 3 farklı bitüm modifiyeri kullanılarak birbiriyle etkileşim sonuçları verilmiştir. Türkiye karayollarında kullanılan polimer modifiye bitüm (TPMB) teknik şartnamesindeki penetrasyon, yumuşama noktası değerleriyle Çalışılan 3 farklı polimer katkılı modifiye bitümlerin (ÇPMB) yumuşama noktası ve penetrasyon değerleriyle karşılaştırılmıştır.

1.1. Bitüm Performans Testlerinde En Önemli Parametreler

Yol kaplamasının dayanıklılığına önemli derecede etkisi olan modifiye bitümün özellikleri Yumuşama noktası (TS 120 EN 1427), Penetrasyon (TS 118 EN 1426) ve Viskozite (ASTM D 4402-87) test methodları ile ölçülebilmektedir (Yüknu vd. 2021).

Polimer modifiye bitüm, yol yapım çalışmalarında asfaltın mühendislik özelliğini arttırmak (çatlakları geciktirmek, yorulma direncini arttırmak, viskoelastik özelliği geliştirmek, kayma direnci yüksek kaplama, düşük sıcaklıkta yüksek mukavemet) amacıyla çeşitli polimerler ve katkıları belirli oranlarda karıştırılması olarak tanımlanmaktadır (Malkoç vd. 2002, Hunter vd. 1994, Choquet vd. 1994, Ertekin vd. 2003).

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından tanımlanan, Türkiye karayollarında kullanılmakta olan bitüm sınıfları Çizelge 1'de Türkiye karayolları polimer modifiye bitüm (TPMB) teknik şartnamesi Çizelge 2'de verilmiştir.

2. Gereç ve Yöntemler

Saf bitüm, SEBS, atık halı(ATH) ile fiziksel karışım ve Elvaloy RET ile reaksiyona girerek modifiye edilmiştir. Sonuçların incelenmesi için modifiye edilmiş bitüme yumuşama noktası, viskozite ve penetrasyon, testleri uygulanmıştır. Orijinal bitüm, SEBS%1, ATH %1 ve Elvaloy RET %2 bileşimde SEM resimleri çekilmiştir.

Çizelge 1. Türkiye karayollarında kullanılan bitüm sınıfları (KGM, 2013).

Sıra No	Standardı	Deney Adı	Bitüm Sınıfları				
			B 40/60	B 50/70	B 70/100	B 100/150	B 160/220
1	TS 118 EN 1426	Penetrasyon, (25°C) 0,1 mm	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220
2	TS 120 EN 1427	Yumuşama Noktası, °C	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43

Çizelge 2. Türkiye karayollarında kullanılan polimer modifiye bitüm (TPMB) teknik şartnamesi (Sağlık vd. 2012).

Deney adı	Birim	TSE	TPMB 64-28	TPMB 70-16	TPMB 70-22	TPMB 70-28	TPMB 76-16	TPMB 76-22	TPMB 78-28	TPMB 82-16
Penetrasyon (25°C, 100g, 5sn)	0.1mm	TSEN 1426	50-90	30-70	30-90	30-90	20-60	20-70	20-70	10-50
Yumuşama noktası min. °C	°C	TSEN 1427	52	62	62	62	67	67	67	70

2.1. Bitüm Modifiyesinde Kullanılan Polimerler

2.1.1. Elvaloy RET

Elvaloy RET, içerisinde Etilen/ Glisid/Akrilat kimyasal bileşimli reaktif terpolimerdir. Dupont firması özellikle ürettiği Elvaloy RET polimer bitüm modifikasyonundaki fiziksel özellikleri geliştirmek için tasarlanmıştır. Şekil 1'de Elvaloy RET'in reaksiyon veren yapısı ve Çizelge 3'de kimyasal bileşim gösterilmiştir (Keyf , 2010).

Çizelge 3. Elvaloy RET'in kimyasal bileşimi.

Malzeme	Kütlece %'si
Etilen akrilat kopolimer	>99
Glisid metaakrilat	<0.4
n-bütül akrilat	<0.4
Düzenlenmemiş katkıları	<1

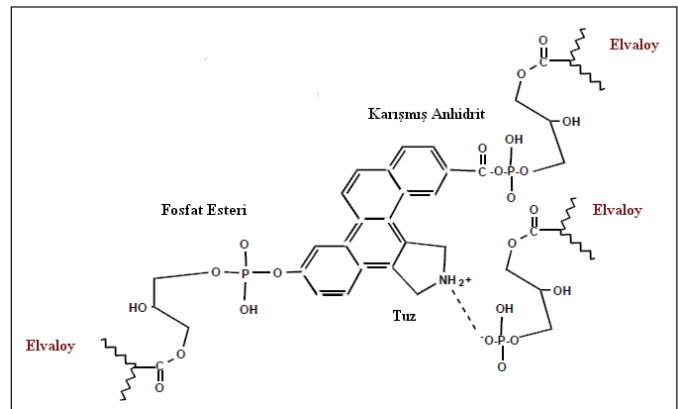
Elvaloy RET; bütül, etilen akrilat ve glisid metakrilatı (gMA, orijinal bitüm ile ısıyla reaksiyon veren yapı) içeren bir terpolimerdir. Elvaloy RET bitüm molekülüyle aşağıdaki şekildeki gibi süper polifosforik asit katalizör etkisiyle kovalent bağ oluşturduğu kabul edilmiştir.

2.1.2. Süper Polifosforik Asit (SPFA)

Süper polifosforik asit katalizörü genel formülü $n > 1$ için $H_{n+2}P_nO_{3n+1}$ 'dir ve Elvaloy RET' in bitümdeki asfaltenik asitlerle reaksiyonu hızlandıracak katalizör olarak % 105 lik süper polifosforik asit kullanılır (Keyf 2010).

2.1.3. Atık Halı (ATH)

Deneyisel çalışmada SAMUR marka halıfleks halı atıkları



Şekil 1. Bitümün Elvaloy RET ile reaksiyonu (Keyf 2010).

kullanıldı. Atık halı kıvrımlı tüylenmiş lifler formunda ortalama 1 mm kalınlık 1.1 cm boyunda kesilmiştir. Atık halı bileşimi; %52 erime noktası 220°C olan poliamid 6, %25 kalsit, %10 erime noktası 215°C stiren bütadien kauçuk, %15 erime noktası 260-270 °C olan selüloz içeren jut (kumaş) içermektedir.

2.1.4. Stiren Etilen Bütülen Stiren (SEBS)

SEBS (Kraton G 1701) stirenik blok kopolimer bazlı termoplastik elastomerdir (Kraton 2022).

2.1.5. Deneyin Yapılışı

TUPRAŞ 50/70 penetrasyonlu bitümden 3.8 kg tartılır, 195 °C'ye kadar ısıtılır ve 120 devir/dk hızla karıştırılır. SEBS ve atık halının bitümle fiziksel karışmasıyla bitüm modifiye edilmiştir. Daha sonra ilave edilen Elvaloy RET'in kimyasal reaksiyon ilavesiyle çalışma polimer modifiye bitüm (ÇPMB) için numuneler 1., 3., 4., 5., 6. ve 7. saatlerde 200 gram olacak şekilde alınmıştır.

Başlama Zamanı (0.saat): 195 °C'de saf bitüme, yüzdesi belli olan SEBS katılır.

1.Saat: 1 saat boyunca SEBS ile karışmış 1.saat örnek numune alınır. Sonra yüzdesi belli atık halı (ATH) ilave edilir.

3. Saat: 2 saat boyunca saf bitüm, SEBS ve ATH aynı sıcaklıkta karıştırılır. 3. saat örnek numune alındıktan sonra yüzdesi belli Elvaloy RET ve %0,2 oranında süper polifosforik asit (SPFA) ilave edilip karıştırılmaya devam edilir (S.B +SEBS +ATH alınan ve RET reaksiyon başlangıç). 3.saat sonu numune alınır.

4. Saat: 1 saat boyunca saf bitüm, atık halı. SEBS ve Elvaloy RET karıştırılır. 4. Saat sonu örnek numune alınır.

5. Saat: saf bitüm + SEBS + Atık halı + Elvaloy RET aynı sıcaklık ve karıştırma hızında devam edilir. 5. Saat sonu numune alınır.

6. Saat: 6 saat sonu (**7.saat**) numune (S.B+SEBS+ATH+RET reak.son) karıştımdan alınır.

6. saat sonu ile 5 saat sonu numune yumuşama noktası çok değişmediği için reaksiyonun sonlandırılabilceği ne karar verilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Saf bitüm; SEBS, ATH, Elvaloy RET olarak % 0.5, 1, 1.5, 2 ve 2.5 artımlı her biri katılırken ilaveten diğer farklı 2 polimer %1 sabit olarak bitüme eklenmiştir. Deneysel çalışma sonucu elde edilen numunelere; ilgili testler yapılır.

- Penetrasyon,
- Yumuşama noktası tayini,
- Viskozite

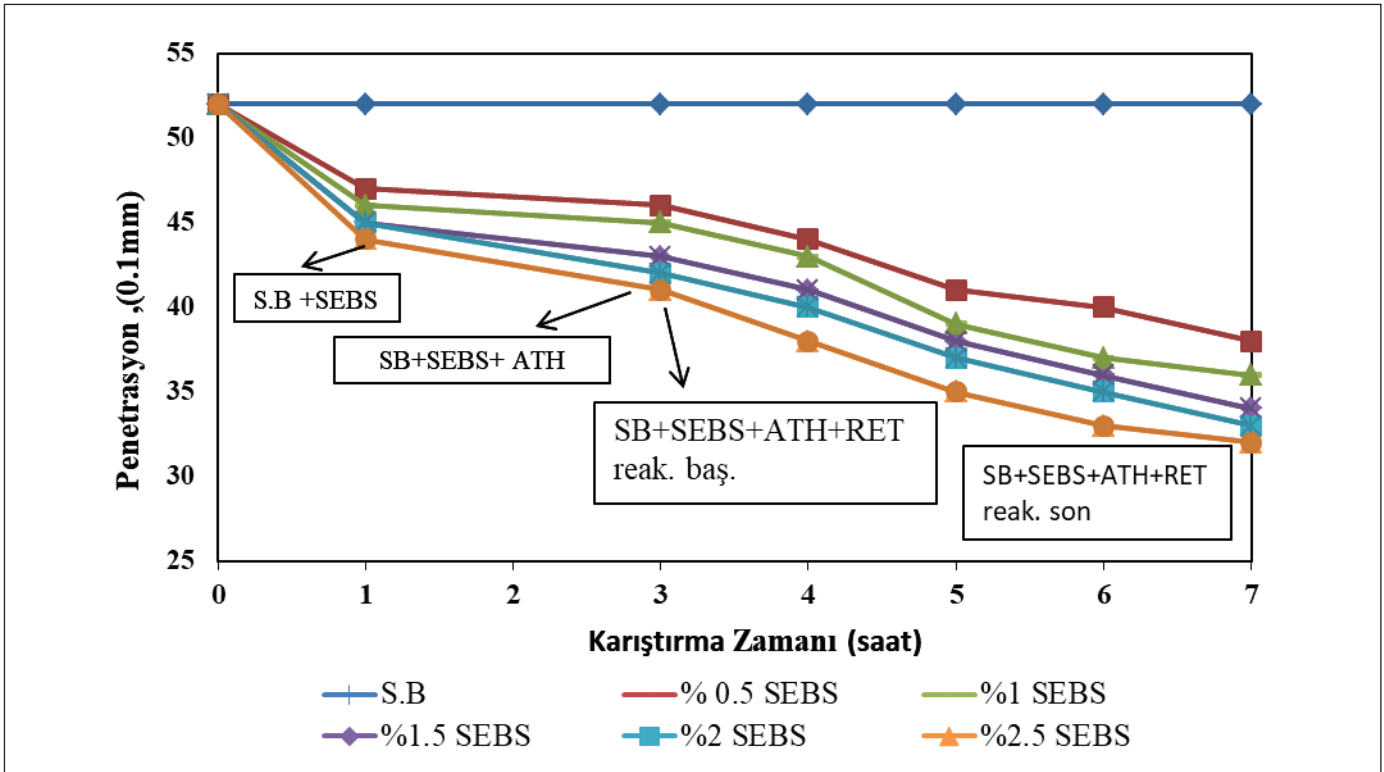
3.1. Değişen SEBS, ATH, Elvaloy RET Oranlarının Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Derecesine Etkisi

Polimer modifiye bitüm çalışmalarında amaç; penetrasyon değerinin azaltılması ve yumuşama noktası değerinin artması yönünde geliştirilmesidir.

3.1.1. Penetrasyon Sonuçları

Penetrasyon deneyinde Testform marka TF-B056 model penetrasyon ölçme cihazı kullanıldı.

Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4 incelendiğinde penetrasyon değerleri özellikle Elvaloy RET'in ağırlıkça yüzde değişimi arttıkça penetrasyon değerinin daha etkin azaldığı belirlendi.

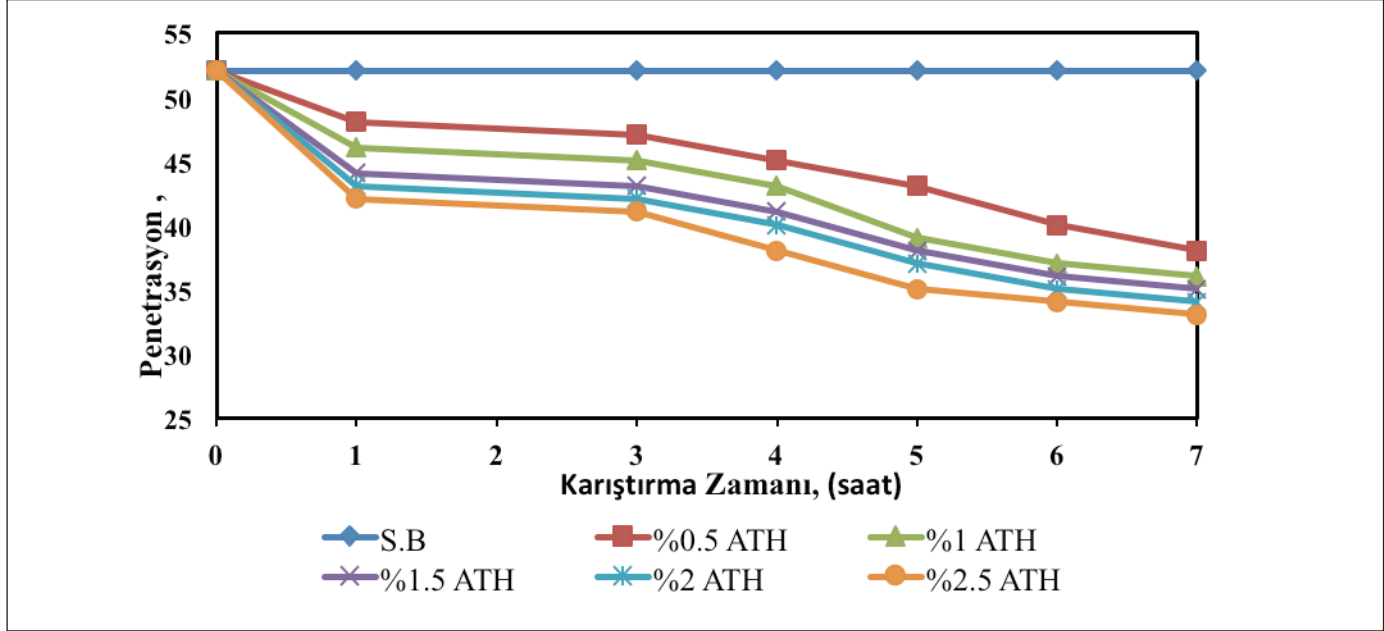


Şekil 2. SEBS Serisi ve %1 Atık Halı %1 RET için penetrasyon değişimi (1.saat S.B+SEBS alınan, 3.saat S.B+SEBS+ATH alınan ve RET reaksiyon başlangıç (ilave), 7.saat S.B+SEBS+ATH+ RET reak.son).

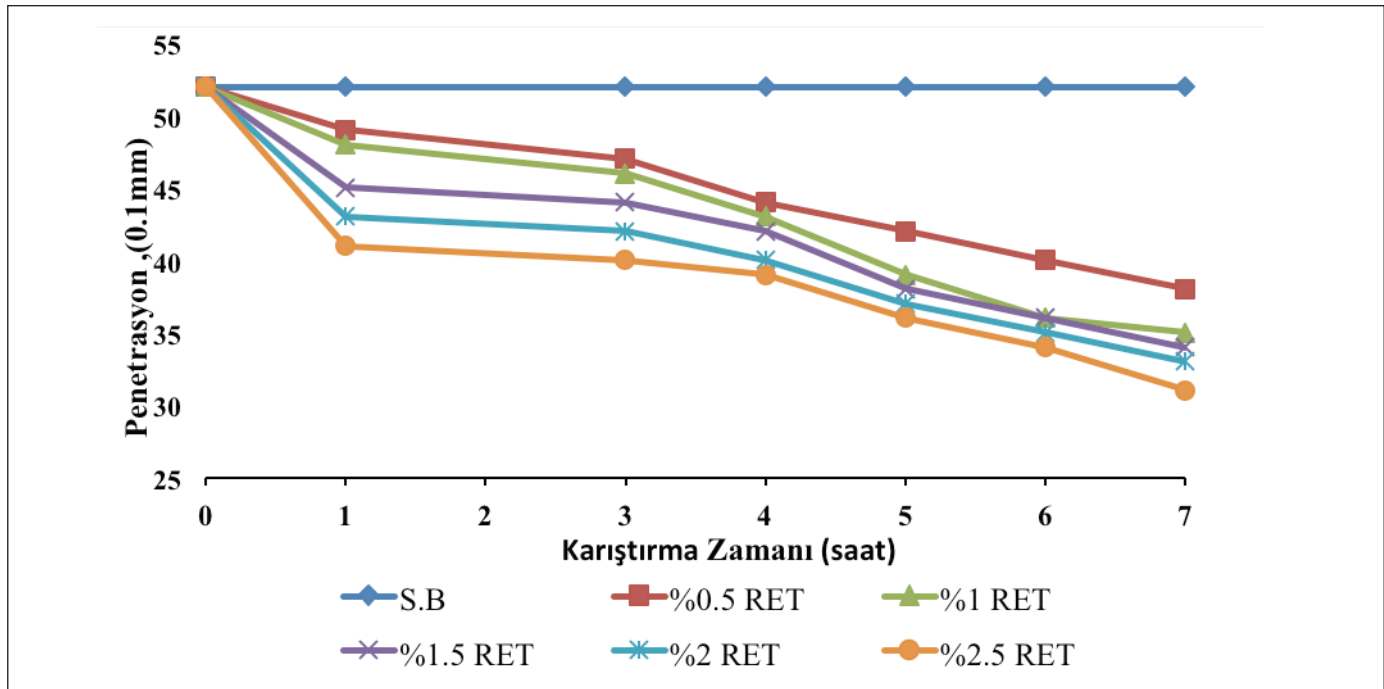
3.1.2. Yumuşama Noktası Sonuçları

Yumuşama noktası deneyinde Testform marka TF-B072 model yumuşama noktası tayin cihazı kullanıldı. Şekil 5,

Şekil 6 ve Şekil 7 incelendiğinde özellikle Elvaloy RET ağırlıkça yüzde değişimi arttıkça yumuşama noktası değeri arttığı tespit edildi.



Şekil 3. Atık Halı Serisi ve %1 SEBS %1 RET için penetrasyon değişimi (1.saat S.B+SEBS alınan, 3.saat S.B+SEBS+ATH alınan ve RET reaksiyon başlangıç (ilave), 7.saat S.B+SEBS+ATH+ RET reak.son).

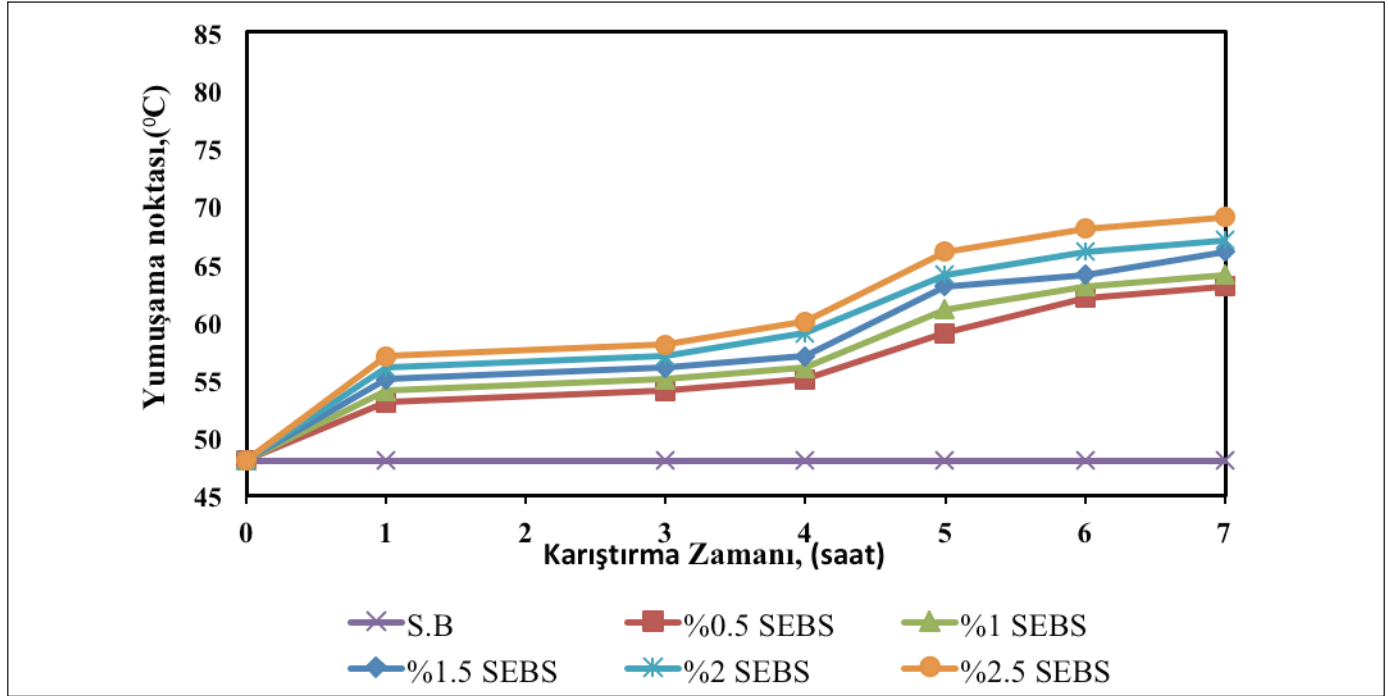


Şekil 4. RET Serisi ve %1 SEBS %1 Atık Halı için penetrasyon değişimi (1.saat S.B+SEBS alınan, 3.saat S.B+SEBS+ATH alınan ve RET reaksiyon başlangıç (ilave), 7.saat S.B+SEBS+ATH+ RET reak.son).

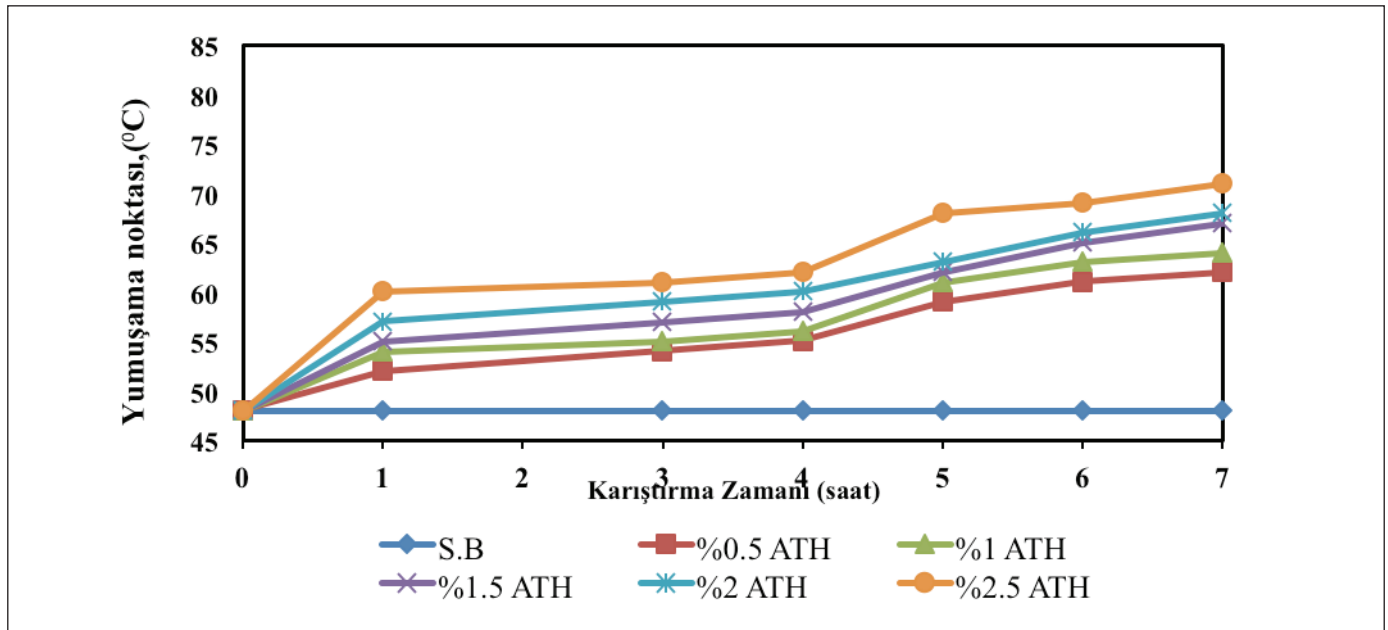
3.2. Viskozite (Ölçümler Hangi Cihazda Hangi Parametrelerle Yapıldı)

Viskozite deneyleri Brookfield marka DV2TL marka viskozimetresinde 130 °C sıcaklıkta yapıldı. Viskozite ölçümleri Şekil 8 de verilmektedir.

%2 RET %1 SEBS %1 Atık halı bileşimindeki polimer modifiye bitüm viskozitesi saf bitüm 50/70 bitüm için 850-950 cP olarak belirlendi. 1. Saate SEBS etkisiyle bitüm viskozitesi 1100 cP ye kadar arttı. 3. Saate ise SEBS + ATH ile birleşik etkisiyle yaklaşık 1900-2000 cP aralığındadır. 3. saatin



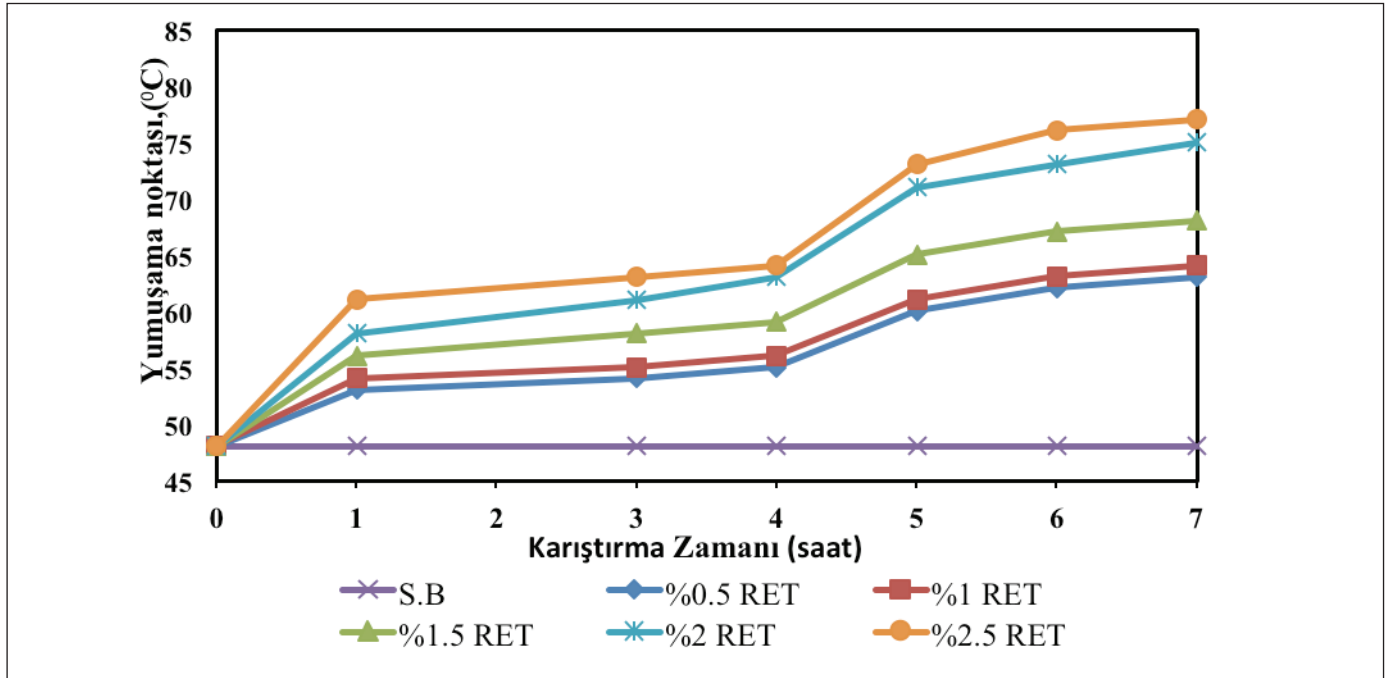
Şekil 5. SEBS Serisi ve %1 Atık Halı %1 RET için yumuşama noktası (1. saat S.B+SEBS alınan, 3. saat S.B+SEBS+ATH alınan ve RET reaksiyon başlangıç (ilave), 7. saat S.B+SEBS+ATH+ RET reak.son).



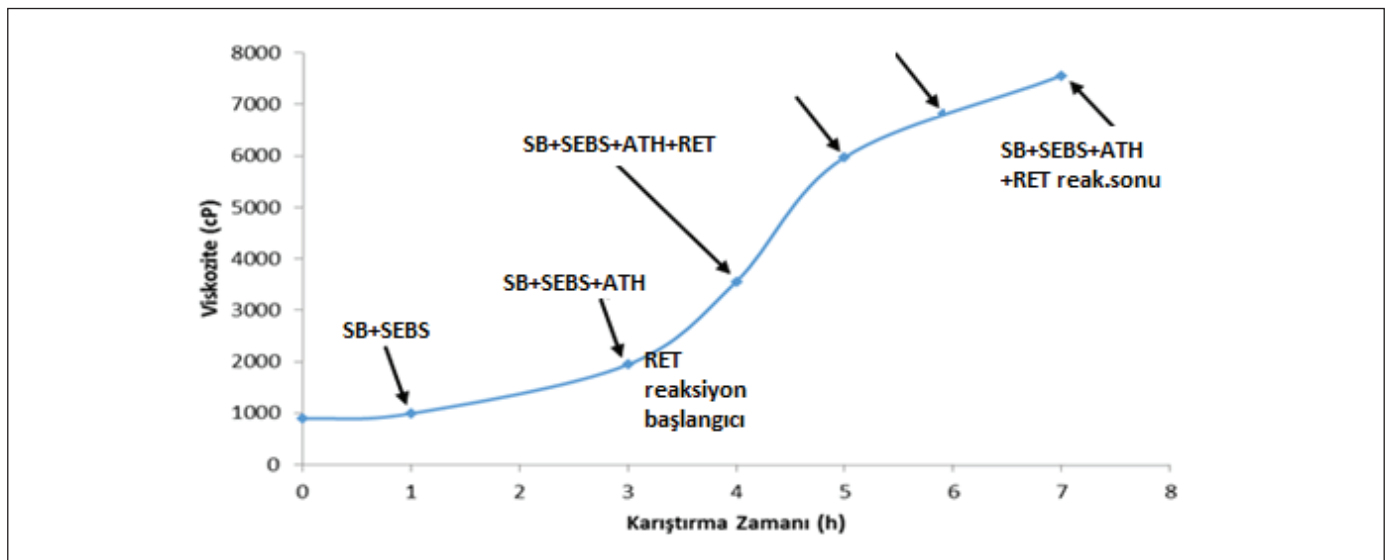
Şekil 6. Atık Halı Serisi ve %1 SEBS %1 RET için yumuşama noktası (1. saat S.B+SEBS alınan, 3. saat S.B+SEBS+ATH alınan ve RET reaksiyon başlangıç (ilave), 7. saat S.B+SEBS+ATH+ RET reak.son).

başında eklenen elvaloy RET'in etkisiyle 7. saatteki numunenin bitüm viskozitesi 7200-7500 cP değerine ulaşmıştır. Viskozitedeki artış özellikle 3. Saatin başından 7 saate kadar olan aralıkta elvaloy RET'in bileşimindeki glisid metakrilat grubuyla asfaltenik asitlerin polifosforik asit katalizörlüğünde reaksiyona girmesinden dolayı yaklaşık 5100-5400 cP'lık viskozite artışı tespit edildi. Elvaloy RET'in glisid metaakri-

lat grubuyla bitüm içindeki asfaltenik asitle elvaloy RET'in reaksiyon sonunda kovalent bağ oluşması sonucu bağlı etilen zincirinin bitüm içindeki sarmal zincir dağılımı bitümü topaklandırarak, büzerük mukavemet artımına sebep olmaktadır. Çalışılan polimer modifiye bitümde akışkanlığın korunabilmesi için ağırlıkça %2 RET miktarı üzerinde asfalt ağı topaklanacağından dolayı tavsiye edilmez.



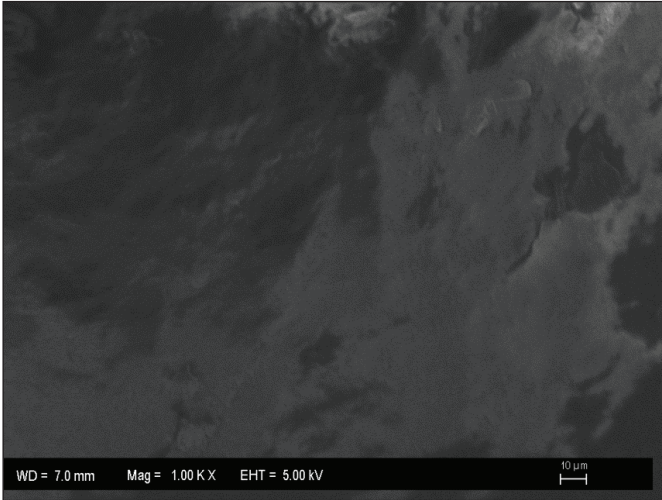
Şekil 7. RET Serisi ve %1 SEBS %1 ATH için yumuşama noktası (1.saat S.B+SEBS alınan, 3.saat S.B+SEBS+ATH alınan ve RET reaksiyon başlangıç (ilave), 7.saat S.B+SEBS+ATH+ RET reak.son).



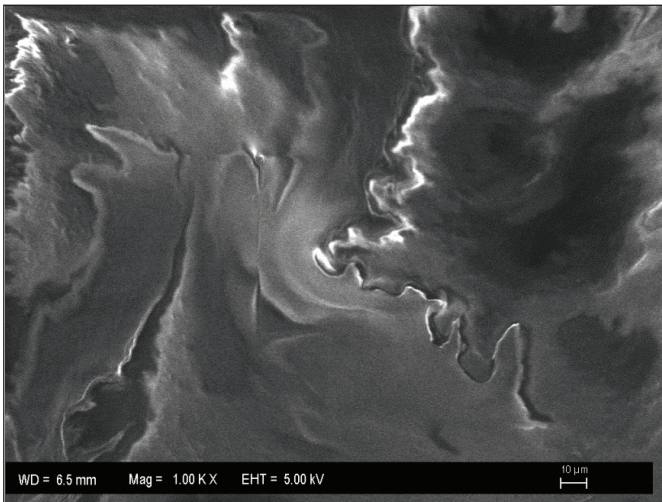
Şekil 8. %2 RET %1 SEBS %1 ATH için 130 °C deki viskozitenin (cP) zamanla değişimi (1.saat S.B+SEBS alınan ,3.saat S.B+SEBS+ATH ve RET reaksiyon başlangıç), 7.saat S.B+SEBS+ATH+RET reaksiyon sonu).

3.3. Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

Elvaloy RET'in reaksiyon sonrasında modifiye edilmiş bitümün, saf bitüme göre değişen morfolojik yapısı hakkında bilgi edinebilmek amacıyla SEM mikrografları için Zeiss marka EVO LS 10 kullanılmıştır. Aynı büyültme ölçeği kullanılarak Saf bitüm ve modifiye bitüm için alınan görüntüler Şekil 9-10'de sunulmuştur. Saf bitümün SEM sonuçları incelendiğinde, saf bitüm yapısında bulunan doymuşlar, asfaltener, reçineler birbirine girgin olduğundan renk tonlarına bakıldığında homojen bir yapı görünmektedir. Reaksiyon sonrasında modifiye edilmiş bitümde ise, dağılım bölgelerinde modifiyer polimerlerin morfolojiyi nasıl değiştirdiği görülmektedir.



Şekil 9. Saf bitüm SEM mikrografı.



Şekil 10. 7.saat örnek modifiye bitüm (S.B+SEBS+ATH+ RET reak.son) SEM mikrografı.

3.4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada polimer modifiye bitümde ATH, SEBS ve reaktif terpolimer (Elvaloy RET) karışımı denendi. Saf bitüme göre penetrasyon değerlerinde azalma, yumuşama noktasında değerlerinde ve viskozitede artış belirlendi. Saf bitüm, SEBS atık halı karışımındaki viskozite değeri yaklaşık 1900-2000 cP aralığındadır fakat Elvaloy RET'in bileşimindeki glisid metakrilat grubuyla asfaltener polifosforik asit katalizöründe reaksiyona girmesinden dolayı viskozitedeki artış özellikle 3. Saatin başından 7 saate sonuna kadar olan aralıkta yaklaşık 5100-5400 cP'lık viskozite artışı gerçekleşir.

Saf bitüm ile reaksiyon sonrası modifiye edilmiş bitümün gözenek yapısının incelenilmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemi kullanılmıştır. SEM mikrografları incelendiğinde, modifiye olmuş bitümün saf bitüme göre morfolojik yapısının değiştiği görülmektedir.

ÇPMB; SEBS 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5% ağırlıkça yüzde artımlı ve sabit %1 ATH + %1 Elvaloy RET içerikli, ATH 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5% ağırlıkça yüzde artımlı ve sabit % 1 SEBS + Elvaloy RET %1 içerikli ve Elvaloy RET 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 % yüzde ağırlıkça artımlı ve sabit %1 ATH + SEBS %1 içerikli 7. Saat alınan çalışma polimer modifiye bitüm 15 numune TPMB şartnamede 8 farklı koddaki yumuşama noktası sıcaklık değerlerini sağlamaktadır. Ayrıca çalışma polimer modifiye bitüm penetrasyon değerleri, TPMB şartnamedeki 64-28 kodlu 50-90 penetrasyon değeri hariç diğer 7 TPMB (Türkiye karayolları polimer modifiye bitüm şartnamesinde) koddaki penetrasyon değerlerini sağlamaktadır.

Çalışılan polimer modifiye bitüm; sıcaklığa dayanımı arttırdığından, penetrasyon değerinin azaltılmasından dolayı yüke dayanım değerinin artmasıyla karayolları polimer modifiye bitüm performansı şartnamesi dikkate alındığında, Çalışılan polimer modifiye bitüm; penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri açısından oldukça önemli katkı sağlayacağı tespit edilmiştir.

4. Kaynaklar

Bulatovic, V.O., Rek, V., Markovic. J. 2014. Rheological properties of bitumen modified with ethylene butylacrylate glycidylmethacrylate, *Polym. Eng. Sci.*, 54 (5) pp. 1056-1065, <https://doi.org/10.1002/pen.23649>

Choquet, F. 1994. "Polymers and Modified Binders", Technical Note Presented at Belgian Road Research Center, 1:25-26.

- Çubuk, M. 2007.** Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi, Doktora Tezi, GÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ertekin, S.B. 2003.** Polyefin Katkıların Asfaltın Kıvamı ve Yumuşama Noktasına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Harold, R., Paul, P.E. and Chris, P.E. (1995).** "Pavement Distress, Technical Assistance Report, Louisiana Transportation Research Center.,1:12-16.
- Holleran, I., Masad, E., Wilson, D.J., Malmstrom, J., Holleran, G. & Alrashydah, E. 2022.** Effect of reactive ethylene terpolymer modification on bitumen's microstructure, rheology, and porous asphalt mix properties. *International Journal of Pavement Engineering*. pp.1-22 DOI:10.1080/10298436.2022.2086693
- Hunter, F.M. 1994.** Bituminous Mixtures in Road Construction, Thomas Telford, London.
- Jasso, M., Hampl, R., Vacin, O., Bakos, D., Stastna, J., Zanzotto, L. 2015.** Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elvaloy and polyphosphoric acid. *Fuel Process. Technol.* DOI:10.1016/j.fuproc.2015.09.002
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), Karayolu Teknik Şartnamesi, 2013** ,412/9, Ankara. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.tamyol.com.tr/UserFiles/Content/KGM_Teknik_Sartnamesi_2013.pdf
- Keyf, S. 2010.** Investigation of penetration and penetration index in bitumen modified with SBS and reactive terpolymer. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi* 28, 26-34.
- Kraton Polymers G(SEBS).2022.** <https://kraton.com/products/pdsDocs/polymer/G1701M.pdf>
- Luo, W. and Chen, J. 2011.** "Preparation and Properties of Bitumen Modified by EVA Graft Copolymer". *Construction and Building Material*. 25: 1830-1835, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.079
- Malkoç, G. 2002.** Yol Üst Yapılarında Kullanılan Modifiye Asfaltlar ve Modifiye Bitüm Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Metli, M. 2007.** The Effect of SBS Based Polymer Modified Bitumen and Bituminous Mixtures on The Performance of Pavements, Yüksek Lisans Tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Sağlık, A., Orhan, F. ve Güngör, A.G. 2012.** BSK Kaplamalı Yollar İçin Bitüm Sınıfı Seçim Haritaları, Ulaştırma Denizcilik Ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, sayfa 7.
- Si Bachir, D., Dekhli, S., Mokhtar, K.A., 2016.** Rheological Evaluation of Ageing Properties of SEBS Polymer Modified Bitumens. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 60(3), pp. 397-404, DOI: 10.3311/PPci.7853
- Witczak, M.W., I. Hafez., X. Qi. 1995.** Laboratory Characterization of Elvaloy® Modified Asphalt Mixtures: Vol. I-Technical Report., University of Maryland, College Park, Maryland.
- Yıldırım, Y. 2007.** Polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 21, pp. 66-72 72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>
- Yunbin, K., Jitao, C., Song, X., Chongyu, B., Chao, Z., Xiaojuan, J., 2022.** Storage stability and anti-aging performance of SEBS/ organ-montmorillonite modified asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 341,127875 pp. 1-10 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127875>
- Yüknü, K., Öztürk, T., Komut, M. 2021.** Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı, Ulaştırma Ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Zhu, J., Birgisson, B., Kringos, N. 2014.** Polymer modification of bitumen Advances and challenges. *Eur. Polym. J.*, 54 18-38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02005>



Konya Apa Barajı Havzasında Meteorolojik ve Hidrolojik Kuraklık Trend Analizi

Trend Analysis of Meteorological and Hydrological Drought at Apa Dam (Konya) Basin

Türker Tuğrul^{1*}, Mehmet Ali Hınıs²

¹Gazi Üniversitesi, Rektörlük, 06560, Ankara, Türkiye

²Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, 68100, Aksaray, Türkiye

Öz

Bir baraj havzası yönetiminde yağış ve akım parametreleri ile kuraklık değerlendirilmesi önemli bir yere sahiptir. Bu parametrelerdeki değişimlerin tespit edilmesi gelecekte ilgili su kaynaklarının planlamasına katkıda bulunacaktır. Bu çalışmada Konya Kapalı Havzası sınırları içerisinde bulunan Apa Barajı havzasına ait yağış ve akım verilerinin ve bu verilere bağlı elde edilen iki adet kuraklık indisinin (Normalleştirilmiş Yağış İndisi (NYİ) ve Akım Kuraklık İndisi (AKİ)) trend analizi yapılmıştır. Kuraklık indislerinde 3, 6, 9 ve 12 aylık yağış toplamlarına karşılık gelen indisler kullanılmıştır. Trend analizinde parametrik olmayan Mann-Kendall (MK), Spearman's Rho ve Yenilikçi Şen Trend Yöntemi (YŞTY) kullanılarak istatistiksel anlamda verilerde değişim olup olmadığı ve değişim trendinin hangi yönde olduğu araştırılmıştır.

Trend analizinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde YŞTY'den edilen bulgularda tüm verilerde (yağış, akım, NYİ ve AKİ) artan trendlerin, MK'den elde edilen bulgularda NYİ6, NYİ9 ve NYİ12'de ($\alpha=0.01$ anlamlılık seviyesinde) artan trend, NYİ3 ve AKİ12'de ($\alpha=0.10$ $\alpha=0.05$ anlamlılık seviyesinde sırasıyla) artan trend bulunmuş diğer verilerde trend anlamlı bulunmamıştır. Spearman's Rho testinde ise NYİ6, NYİ9 ve NYİ12'de ($\alpha=0.01$ anlamlılık seviyesinde) artan trend bulunmuş, diğer verilerde trend anlamlı bulunmamıştır. Yağış ve akım verilerinde; MK ve Spearman's Rho testlerinde trend tespit edilemezken, YŞTY'de bütün verilerde artan trendin meydana geldiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Trend analizi, Kuraklık, Yağış, Yenilikçi Trend Analizi, Mann-Kendall, Spearman's Rho, Baraj yönetimi

Abstract

Evaluation of precipitation and flow parameters and drought are essential in the management of a dam basin. Determining the changes in these parameters will contribute to the planning for the future of water resources. In this study, trend analysis of precipitation and flow data of the Apa Dam basin located in the boundaries of Konya Closed Basin and two drought indices namely Standardized Precipitation Index (SPI) and Streamflow Drought Index (SDI), obtained based on these data were performed. In the drought indices, indices for the corresponding to the precipitation totals of 3, 6, 9 and 12 months were used. In trend analysis, non-parametric Mann-Kendall (MK) test, Spearman's Rho test and Innovative Trend Methods (ITA) were used to investigate whether there was a statistical change in the data and in which direction the change trend was.

The results of trend analysis revealed that there is an increasing trend in all data in the findings obtained from ITA and increasing trend in SPI6, SPI9 and SPI12 in $\alpha=0.01$ significance level in the findings obtained from MK and increasing trend in SPI3 and SDI 12 in $\alpha=0.10$ $\alpha=0.05$ significance level respectively, but the trend was not statistically significant in other data. In Spearman's Rho test, on the other hand, an increasing trend was found in SPI6, SPI9 and SPI12 in $\alpha=0.01$ significance level. However, the trend was not statistically significant in other data.

Keywords: Trend analysis, Drought, Precipitation, Innovative Trend Analysis, Mann-Kendall, Spearman's Rho, Dam management

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: turkertugrul@gazi.edu.tr

Türker Tuğrul orcid.org/0000-0001-7547-847X

Mehmet Ali Hınıs orcid.org/0000-0002-1870-3535



1. Giriş

Son yıllarda, atmosferdeki miktarlarında artış tespit edilen sera gazlarının etkisiyle canlılar üzerinde olumsuz etkileri olan iklim değişikliği, güncel araştırma konusu olmaya devam etmektedir. İklim değişikliğinin olumsuz etkilerinden birisi de kuraklıkların daha sık görülmeye başlamasıdır. Ortalama yağış miktarından belirli bir süre sapma olarak ifade edilen kuraklık, meydana geldiği takdirde; sonuçları tarımı, ekosistemleri ve su kaynaklarını etkileyen iklimsel bir doğal afettir (Li vd. 2021, Williams vd. 2020). Literatürde farklı sınıflandırmalar mevcut olsa da, kuraklık meydana geldiği mekâna ve zamana bağlı faktörlere göre genel olarak meteorolojik, tarımsal, hidrolojik ve sosyo-ekonomik olmak üzere dört farklı kategoride sınıflandırılmaktadır. Meteorolojik Kuraklık; yağış azlığı ile ortaya çıkan kuru dönemleri tanımlamaktadır. Tarımsal Kuraklık; yağış azlığına bağlı olarak meydana gelen zemin nemindeki azalmanın tarım üzerindeki etkilerini ifade etmek için kullanılan kuraklık sınıfıdır. Hidrolojik Kuraklık; yağışın akışa geçmesi ile beslenen akarsu, göl ve baraj gibi yerüstü ve yeraltı suyu kaynaklarındaki su seviyesinin gerekli ihtiyacın altına inmesi ile ortaya çıkan durumu ifade etmektedir. Sosyo-ekonomik Kuraklık; su kaynaklarındaki eksiklik sonucu ekonomik ürünlerde arzın talepten az olması sonucu ortaya çıkan durumlar için ifade edilmiştir (Dracup vd. 1980, Heim 2002, Hınıs 2013, McKee vd. 1993, White ve Walcott 2009).

Kuraklığın şiddeti ve büyüklüğünü belirleyebilmek için literatürde birçok kuraklık indisi önerilmiştir. Bunlardan birisi, sıcaklık ve su dengesine bağlı olarak hesaplanan Palmer Kuraklık Şiddet İndisi'dir (PKŞİ) (Palmer 1965). Literatürde ilk kullanımından 1990'lı yıllara kadar oldukça popüler olan bu indisin yerini McKee vd. (1993) tarafından önerilen sadece yağış verisi ile hesaplanan Normalleştirilmiş Yağış İndisi (NYİ) ve akım verisine bağlı olarak Nalbantis (2008) tarafından geliştirilen Akım Kuraklık İndisi (AKİ) almıştır. Bütün dünyada kabul görmüş tek bir kuraklık indisinden bahsedilemezken, kullanım ihtiyacına cevap vermesine göre literatürde önerilmiş ve yaygın olarak kullanılan çeşitli kuraklık indisleri hakkında bilgi için Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından yayınlanan el kitabına (WMO, 2016) bakılabilir. Girdi olarak sadece yağış verisinin kullanılmasından dolayı hesap kolaylığı, farklı iklim bölgelerine uygulanabilirliği, çoklu zaman adımları (1, 3, 6, 9, 12, 24 aylık toplamları) ile farklı hidrolojik durumları temsil edebilmesi ve yorum kolaylığı açısından NYİ literatürde en çok tercih edilen hesaplama indislerindedir. Bu sebeple, bu çalışma meteorolojik kuraklıkların ifade edilmesinde NYİ, hesaplanabilirliği

NYİ ile aynı olan ve akım verisinde etkili sonuçlardan vermesinden dolayı hidrolojik kuraklıkların değerlendirilmesinde ise AKİ kullanılmıştır.

Dogan vd. (2012) Konya Kapalı Havzası'nda NYİ, Çin Zindisi, Efektif Kuraklık İndisi (EKİ)'ninde içinde bulunduğu birçok kuraklık indisini birbirleriyle kıyaslamış, elde ettiği bulgularda EKİ'nin diğerlerine göre daha iyi performans verdiğini dile getirmiştir. Aktürk ve Yıldız (2014) Kırıkkale'de, NYİ'nin farklı zaman adımlarında kuraklık analizi yapmışlar ve çalışma sonuçlarında bölgede gerçekleşen önemli kuraklık olaylarını tespit ederek, bölgenin kuraklık karakterizasyonunu ortaya çıkarmışlardır. Güneydoğu Anadolu Bölgesinde çalışan Tuğrul vd. (2019), EKİ'nin aylık hesap yönteminden faydalanarak, bölge için önem arz eden kuraklıkları tespit etmiş, bölgedeki illerde meydana gelen kuraklıkları incelemiş, kuraklık olaylarının toplam zamandaki gerçekleşme yüzdelerini tespit etmişlerdir.

Seyhan ve Ceyhan Havzalarından elde ettiği sıcaklık ve yağış verisiyle Mann-Kendall (MK) yönteminden yararlanarak mekânsal trendleri inceleyen Gumus (2019), %10 önem seviyesinde sıcaklık verilerinde anlamlı artan trendlerin olduğunu bulgularında ifade etmiş ve 1990-2000'li yılların ortalarını ise trendlerin başlangıç yılı olarak belirlemiştir. Aylık yağış verisinden faydalanarak NYİ yöntemiyle kuraklık analizi yapan Sharafati vd. (2019), İran'ı çalışma alanı olarak seçmişlerdir. Kuraklıkların farklı zaman aralıklarında karakterizasyonunu ortaya koymuşlar ve MK testi ile indis sonuçlarının trendlerini incelemişlerdir. Bulgularında; %5 önem seviyesinde, çalışma alanının güney kesimlerinde NYİ6 verisinin, kuzey bölgesinde NYİ9 verisinin anlamlı artan trendde olduğunu tespit etmişlerdir. Bhunia vd. (2020) Yeni Zelanda bölgesinde NYİ yönteminden faydalanarak kuraklıkların analizini yapmışlardır. Bölgenin detaylı olarak kuraklık özelliklerini belirledikten sonra, elde ettiği bulguların trendlerini incelemişlerdir. Trendleri incelerken MK'den yararlanmış ve bulgularında; %10 önem seviyesinde anlamlı bir trend olmadığını ifade etmiştir. Naz ve vd. (2020), Pakistan'ın Balochistan kentindeki kuraklıkları NYİ yöntemiyle analiz etmiş ve bu analizde 10 farklı istasyondan alınan aylık toplam yağış verisini kullanmışlardır. Sonrasında, elde ettikleri indis sonuçlarının MK yöntemiyle trendlerini irdelemişlerdir. Sonuçlarında, istatistiksel olarak %5 önem seviyelerinde, NYİ3 verisinde bazı istasyonlarda anlamlı azalan trendlerin meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Gumus vd. (2021) Güneydoğu Anadolu Bölgesinde kuraklık analizi yaparak elde ettiği sonuçların trendlerini araştırmışlardır. Kuraklık analizi için NYİ, trend analizi için paramet-

rik olmayan MK, Mann-Kendall Sıra Korelasyon ve Sen'in Slope Tahmin'i yöntemlerinden faydalanmışlardır. Kuraklık analizinden elde ettiği bulguların trendini inceleyen araştırmacılar, özellikle NYİ12 için azalan trendlerin olduğunu çalışmalarında ifade etmişlerdir. Yeşilirmak havzasında 7 farklı istasyonda çalışma yapan Katipoglu vd. (2022), AKİ yardımıyla kuraklık analizi yapmışlar, buradan elde ettiği bulguların; MK, Yenilikçi Şen Trend Yönetimi (YŞTY) ve Thiel Şen Yaklaşımı yöntemleriyle farklı anlamlılık seviyelerinde trendlerini incelemişlerdir. MK ile hemen hemen aynı sonuçları göstermesine rağmen, YŞTY yönteminin daha hassas sonuç verdiği bulgularında belirtmişlerdir. Ayrıca, MK ve YŞTY yönteminde, yaz ve sonbahar aylarında kuraklık şiddetinde anlamlı azalış gözlemlenirken, diğer zaman periyodlarında artış trendi olduğunu dile getirmişlerdir.

Yağış, akış ve kuraklık verilerindeki geçmiş yıllara ait trendler, gelecekteki olası trendlerin ve değişikliklerin habercileridir. Bu sebeple, geçmişteki olası trendleri tanımlayabilmek, su kaynaklarının gelecek planlamasına yardımcı olacaktır.

Bu çalışmada, Konya Kapalı Havzasında bulunan, tarımsal faaliyetlerde önem arz eden, sulama amacıyla çiftçilerin yararlandığı bir su kaynağı olan Konya Kapalı havzası içinde yer alan Apa Barajı bölgesinde, yağış verileri kullanılarak NYİ yöntemi ile meteorolojik kuraklık analizi, akım verileri kullanılarak AKİ yöntemi ile hidrolojik kuraklık analizi yapılmıştır. Yağış, akış verileri ile beraber, elde edilen (NYİ3, NYİ6, NYİ9, NYİ12, AKİ3, AKİ6, AKİ9 ve AKİ12) kuraklık indisleri üzerinde; Mann-Kendall, Spearman's Rho ve Yenilikçi Şen Trend Yöntemi (YŞTY) kullanılarak trend analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarının, su kaynaklarının planlanmasında, baraj yönetiminde ve olası değişimlere karşı bir önlem alınmasında karar verici mercilere yardımcı olması amaçlanmıştır.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Çalışma Alanı ve Veri

İnşası ve işletmesi 1950 ve 1965'li yıllara dayanan Apa Barajı, Konya Kapalı havzasının önemli ve büyük su kaynaklarından. Sulama ve taşkın koruma amacıyla Çarşamba suyu üzerine yapılan Apa barajı, maksimum 171,590 hm³

kapasiteye sahip olup, toprak dolgu tipinde bir barajdır. Barajın temel su kaynağı Beyşehir Gölü ile Suğla Depolaması olup, ayrıca, Bozkır Çarşamba Kanalı ve Bağbaşı Barajından Mavi Tünel vasıtası ile su alınabilmektedir. Baraj ortalama 12 km²'lik yüzey alanına sahiptir (Mert, Bulut ve Solak, 2008). Konum itibarıyla Konya iline bağlı olan Çumra ilçesinin 35 km. güneyinde, Çarşamba Çayı üzerinde ve Apa kasabasıdır (Şekil 1).

Baraj üzerinde meteorolojik verinin ölçümü için herhangi bir istasyon bulunmamaktadır. Bu sebeple, kuraklık analizleri için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilen, Apa Barajına en yakın üç istasyona (Akören, Çumra, Bozkır İstasyonlarına) ait aylık toplam yağış verisi kullanılmıştır. Temin edilen veri 1955 ile 2020 yılları arasında arasını kapsamaktadır (Şekil 2).

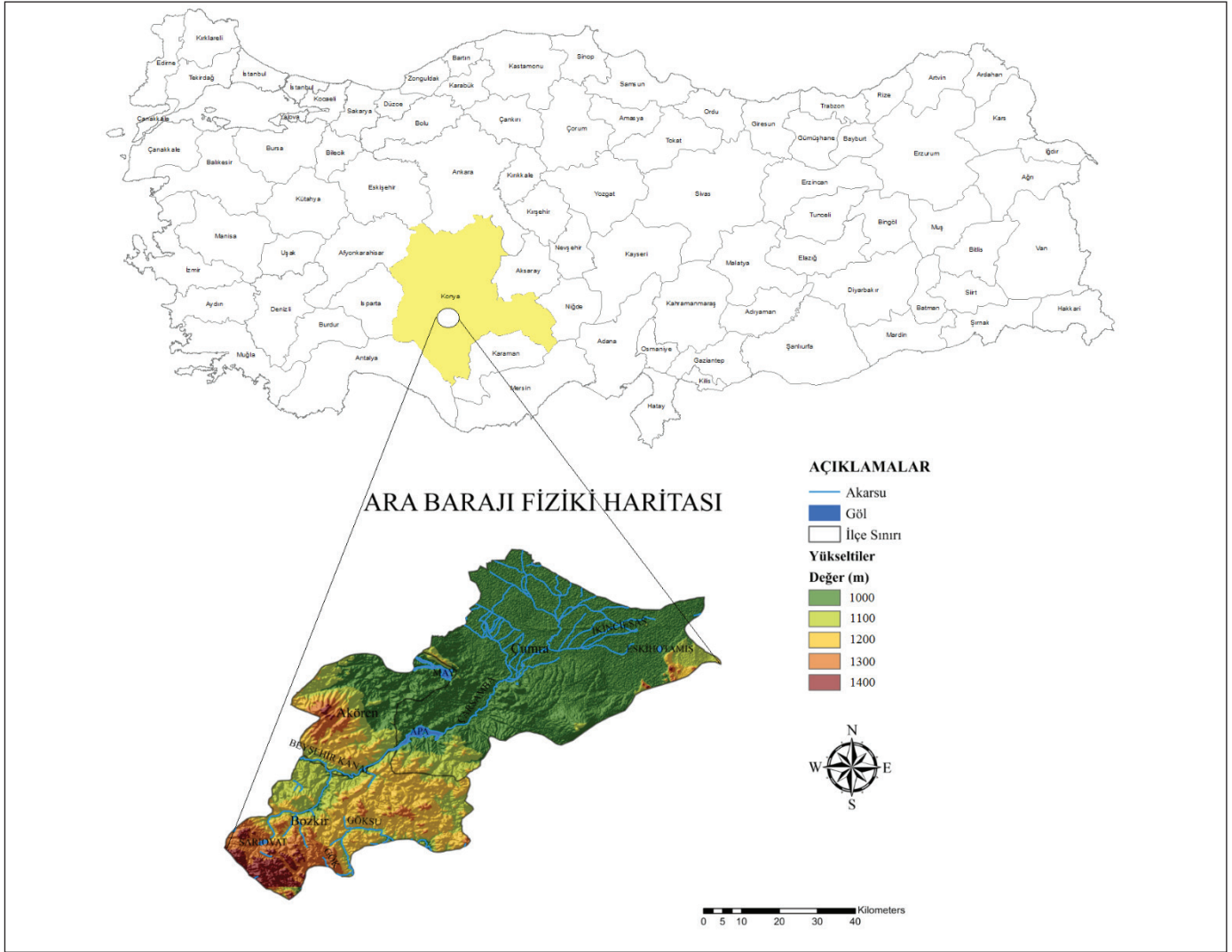
Yağış verisine ilave olarak, barajı besleyen DSI'ye ait en yakın gözlem (D16A115 Çarşamba Suyu Sorkun) istasyonuna ait akım verisi de bu çalışmada kullanılmıştır. Bu 1974 ile 2015 yılları arasını kapsamaktadır ve akım gözlem yıllıklarından temin edilmiştir (Şekil 3). Bu çalışmada kullanılan verilere ait özet bilgiler Çizelge 1'de gösterilmiştir.

2.2. Normalleştirilmiş Yağış İndeksi (NYİ)

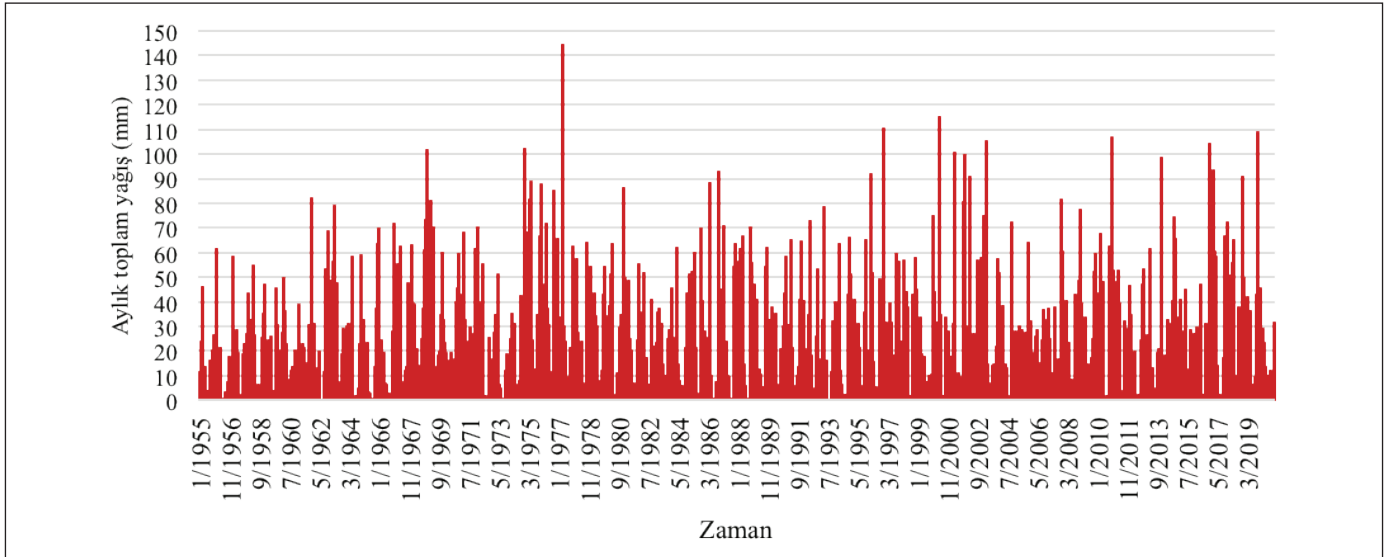
McKee vd. (1993) tarafından önerilen NYİ, sadece yağış verisi kullanmasından dolayı, güvenilir ve farklı bölgelere uygulanabilir ve kolay yorumlanabilir olması sebebiyle kuraklık analizlerinde en yaygın olarak tercih edilen kuraklık indisidir. 1, 3, 6, 9, 12, 24 ve 48 aylık yağış toplamları kullanılarak farklı zaman aralıkları için NYİ hesaplanabilmektedir. Yağış toplamları genellikle normal dağılıma uymadığından yağış toplamlarının Gama dağılıma dönüştürülerek hesaplanması esasına dayanır. Thom (1966) yağış serilerinin Gama dağılımını iyi takip ettiğini raporladığından dolayı, literatürde NYİ hesabı kullanılan yağış verilerinin iki parametrelili Gama dağılımına uyduğu varsayılarak yapılmaktadır. Aslında bu varsayım, literatürde NYİ tabanlı kuraklık izleme çabalarında en yaygın kullanılanıdır. Yağış verilerinin Gama dağılımına iyi uyduğuna dair bir genelleme olsa da, bu iklim olayının meydana gelme koşullarındaki farklılıklar, bunların frekans dağılım özellikleri üzerinde belirleyicidir. NYİ analizinin öncülerinden; Edwards (1999), McKee vd

Çizelge 1. Kullanılan verilere ait özet bilgiler.

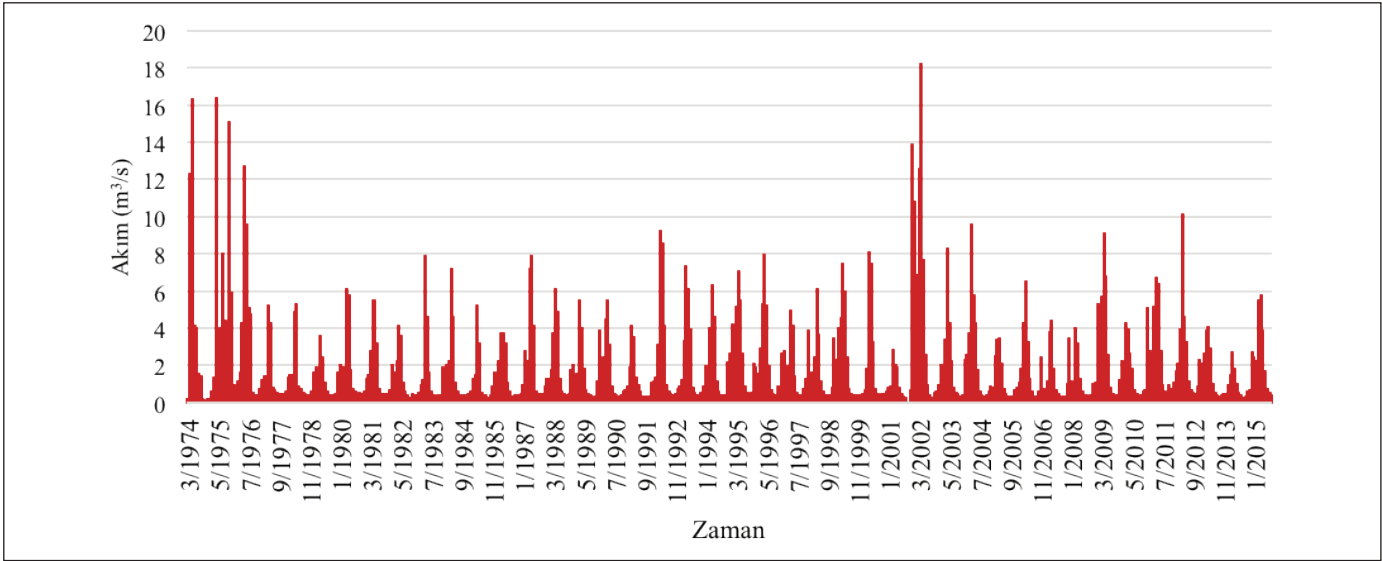
Veri Türü	Veri türü	Ortalaması	Standart sapma	Çarpıklık	Tarih aralığı
Yağış (mm)	Aylık toplam	25.69	23.66	1.24	Ocak.1955-Aralık.2022
Akım (m ³ /sn)	Aylık ortalama	2.16	17.73	2.55	Ocak.1973-Eylül.2015



Şekil 1. Apa Barajı bölgesi.



Şekil 2. Aylık toplam yağış verisi.



Şekil 3. Aylık ortalama akım verisi.

(1993), Guttman (1999), Mishra ve Singh (2009) çalışmalarında, NYİ hesaplama işlemini iki parametrelili Gama dağılımına ve ortalama ve standart sapmanın sırasıyla sıfır ve bir olduğu standart normal dağılıma dayandırmışlardır.

Yağış toplamlarının Gama dağılımına uyduğu varsayılarak, ilk önce yağışın kümülatif Gama dağılımındaki olasılıkları tespit edilir. Daha sonra Gamma Dağılımındaki değerlerin Normal dağılıma geçişi yapılır. Bu olasılıkların normal dağılımdaki z skoru değerleri NYİ değerini verir. Pozitif değerler sulak dönemleri, negatif değerler ise kurak dönemleri gösterir. Çeşitli z skoru değerleri için kuraklık sınıflandırması McKee vd. (1993) tarafından Çizelge 2’de verilmiştir. NYİ hesabı için en az 30 yıllık veri gereklidir (Guttman 1999).

Kullanılan gamma dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu “Eşitlik 1”de verilmiştir.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \tau(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad x > 0 \text{ için} \quad (1)$$

Maksimum olabilirlik metodu kullanılarak, α (sekil) ve β (ölçek) parametreleri tahmini “Eşitlik 2”de verilmiştir.

$$a = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \text{ ve } \beta = \frac{\bar{x}}{a} \quad (2)$$

Çarpıklık sadece sekil parametresi α ’ya bağlıdır. Dolayısı ile α büyüdükçe dağılım normal dağılıma doğru yaklaşır. Burada,

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln x}{n} \quad (3)$$

Burada, \bar{x} yağışın aritmetik ortalaması, n gözlenen yağış sayısıdır. “Eşitlik 3”te n gözlem sayısını ifade etmektedir.

Elde edilen parametreler “Eşitlik 4”te olasılık fonksiyonunu oluşturmakta kullanılır.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (4)$$

Burada, $G(x)$ kümülatif gama olasılık fonksiyonudur. Gama fonksiyonu $x=0$ değeri için tanımlanmadığından, sıfır yağış olasılığı $q=m/n$ formülü ile hesaplanır. Burada m yağış miktarının sıfır olduğu gözlem sayısıdır. Yağış verilerinin kümülatif olasılığı “Eşitlik 5” ile bulunabilir.

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (5)$$

NYİ değerleri $H(x)$ kümülatif olasılık değerlerinin varyansı 1 ve ortalaması sıfır olan normal dağılım z değişkenine dönüştürülmesi ile bulunur. Bulunan bu değerler McKee vd. (1993) tarafından teklif edilmiş ve Çizelge 2 de verilen sınıflandırmalar kullanılarak incelenen bölgenin kuraklık değerlendirilmesi yapılır.

Çizelge 2. NYİ sonuçlarına göre kuraklık kategorileri (McKee vd. 1993)

NYİ Değeri	Kategorisi
$\geq (2)$	Aşırı Sulak
(1.50) - (1.99)	Çok Sulak
(1.00) - (1.49)	Orta Sulak
(0) - (0.99)	Az Sulak
(-0.99) - (0)	Az Kurak
(-1.49) - (-1.00)	Orta Kurak
(-1.99) - (-1.50)	Çok Kurak
$\leq (-2)$	Aşırı Kurak

2.3. Akım Kuraklık İndisi (AKİ)

Apa Barajı Bölgesinde akım kuraklık hesaplamasında Nalbantis (2008) tarafından geliştirilen AKİ kullanılmıştır. Hidrolojik kuraklık göstergesi olarak kabul edilen AKİ hesaplaması; kümülatif akım toplamları $V_{i,k}$ (i yıl, j ay) “Eşitlik 6,7,8,9”da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$j = 1, 2, \dots, 12 \quad (8)$$

$$k = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

N hesaplanan yıl sayısını, k ise belirli periyotları göstermektedir ($k=1$ Ekim-Aralık ayı periyodunu, $k=2$ Ekim-Mart periyodunu, $k=3$ Ekim-Haziran periyodunu, $k=4$ Ekim-Eylül periyodunu ifade etmektedir). Kümülatif toplamlarda, Ekim-Eylül aylarını temsil etmektedir. AKİ, her k -referans periyoduna bağlı olarak her bir hidrolojik yıl için “Eşitlik 10”dan elde edilir. Detaylı hesaplamalar Nalbantis (2008) ‘de bulunabilir.

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{\bar{S}_k} \quad (10)$$

AKİ için kuraklık sınıflandırması NYİ ile aynı olup Çizelge 2 kullanılmaktadır.

2.4. Trend Analizi

2.4.1. Mann-Kendall trend testi (MK)

Zaman serisine ait trendlerinin belirlenmesinde yaygın olarak tercih edilen bu test Mann (1945) ve Kendall (1948) tarafından önerilmiştir. Zaman serilerinde var olabilecek artma (pozitif) veya azalma (negative) yöndeki gidişlerin istatistiksel olarak önemini belirten parametrik olmayan bir testtir. Mann Kendall S test istatistiği ve $sign$ fonksiyonu “Eşitlik 11, 12”ye göre, varyansı S ve Z istatistikleri “Eşitlik 13, 14” ile hesaplanır.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sign(x_j - x_i) \quad (11)$$

$$sign(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j < x_i \end{cases} \quad (12)$$

$$var(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i i(i-1)(2i+5) \right] / 18 \quad (13)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{var(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{var(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (14)$$

n veri sayısını, x_i i ve j zamanındaki veriyi, m veri setindeki tekrar eden gözlem sayısını, t_i ise a zaman serisindeki tekrar eden gözlemleri ifade etmektedir.

2.4.2. Spearman's Rho Testi

Doğrusal trend yöntemlerinde en hızlı sonuç veren Spearman's Rho Testi, literatürde en yaygın kullanılan yöntemlerdendir. Gözlenen veri setleri arasındaki doğrusal ilişkinin varlığını sıra istatistiklerine dayanarak inceleyen bu test iki gözlem serisi arasında anlamlı bir korelasyon olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılır. Hesaplanması “Eşitlik 15”te verilmiştir (Lehmann 1975, Sneyers 1990).

$$r_s = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^n (R(x_i - i))^2}{(n^3 - n)} \quad (15)$$

n yani; veri seti >30 ise; normal dağılım tabloları kullanılır. İstatistiksel değerlendirme için z “Eşitlik 16”da gösterildiği gibi kullanılır.

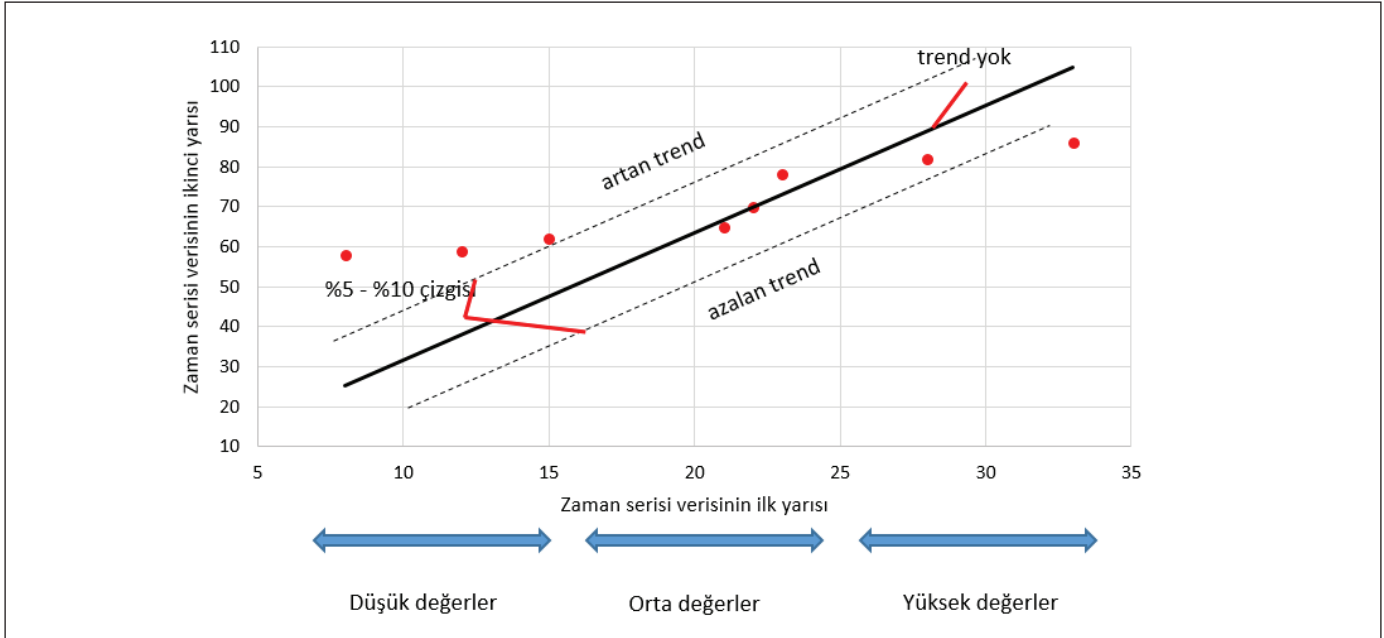
$$z = r_s \sqrt{n-1} \quad (16)$$

Hesaplanan z değeri standart belirlenen kritik $Z_{\alpha/2}$ değerinden büyük olması trendin varlığına işaret eder. Z 'nin işaretine göre artan ya da azalan trendin olduğu tespit edilir.

2.4.3. Yenilikçi Şen Trend Yöntemi (YŞTY)

Diğer trend yöntemlerine nazaran, hangi veri dönemlerinde trendin olup olmadığını gösteren YŞTY, Sen (2012) tarafından geliştirilmiştir. Analiz yönteminin uygulanması için veri seti kronolojik sıra ile başlangıç tarihinden bitişine doğru sıralanır. Sonrasında, veri seti iki eşit parçaya ayrılarak, kendi içlerine küçükten büyüğe doğru sıralanır. İki veri sütunundan birincisi; kartezyen koordinat sisteminde X eksenine, ikincisi ise Y eksenine yerleştirilir. Eğer veri 1:1 doğrusu üzerinde yer alırsa trend yok, altında kalırsa azalan trend, üzerinde kalırsa artan trend olarak değerlendirilir (Şekil 4).

Şen'nin bu yönteminde, istatistiksel değerlendirme için Sıfır hipotezi (H_0) geçerlidir. Önem derecesine bağlı olarak hesaplanan kritik s_{cr} değeri gözlemlerden elde edilen s değerden fazla olduğu zaman trendin varlığından söz etmek mümkün değildir. Aksi durumlarda ise, s 'nin işaretine göre artan ya da azalan trendin varlığından yani alternatif hipotezden (H_a) söz edilebilir (Sen, 2017). Trend testi hesaplamasında veri setinin eğimi Eşitlik 17 ile hesaplanır.



Şekil 4. Yenilikçi Şen Trend Yöntemi saçılım sonuç diyagramı.

$$E(s) = \frac{2}{n} [E(\bar{y}_2) - E(\bar{y}_1)] \quad (17)$$

Buradaki $E(s)$ değeri 0 çıkarsa herhangi bir trend'in varlığından söz edilmesi mümkün değildir. İfade geçen $E(\bar{y}_2)$ iki eşit parçaya bölünen veri setinden 2.'nin ortalaması, $E(\bar{y}_1)$ ise 1.'nin ortalamasını, n toplam veri sayısını ifade etmektedir. Bir sonraki adımda, eğimin varyansı σ_s^2 "Eşitlik 18"deki gibi hesaplanır.

$$\sigma_s^2 = \frac{4}{n^2} [E(\bar{y}_2^2) - 2E(\bar{y}_2\bar{y}_1) + E(\bar{y}_1^2)] \quad (18)$$

İki değer arasındaki korelasyon sayıları "Eşitlik 19"deki gibi hesaplanır.

$$\rho_{\bar{y}_2\bar{y}_1} = \frac{E(\bar{y}_2\bar{y}_1) - E(\bar{y}_2)E(\bar{y}_1)}{\sigma_{\bar{y}_2}\sigma_{\bar{y}_1}} \quad (19)$$

Örneklemlerin standart sapması "Eşitlik 20" ile verilmiştir.

$$\sigma_s = \frac{2\sqrt{2}}{n\sqrt{n}} \sigma \sqrt{1 - \rho_{\bar{y}_1\bar{y}_2}} \quad (20)$$

Burada $\sigma_{\bar{y}_2} = \sigma_{\bar{y}_1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ ile verilir.

Önem derecesine bağlı olarak alt ve üst sınırlar ise "Eşitlik 21"deki gibi hesaplanır.

$$CL_{(1-\alpha)} = 0 \pm s_{cr} \sigma_s \quad (21)$$

s_{cr} değeri önem derecesine bağlı olarak değişmektedir (%95 önem seviyesinde $z=1.96$).

3. Sonuçlar

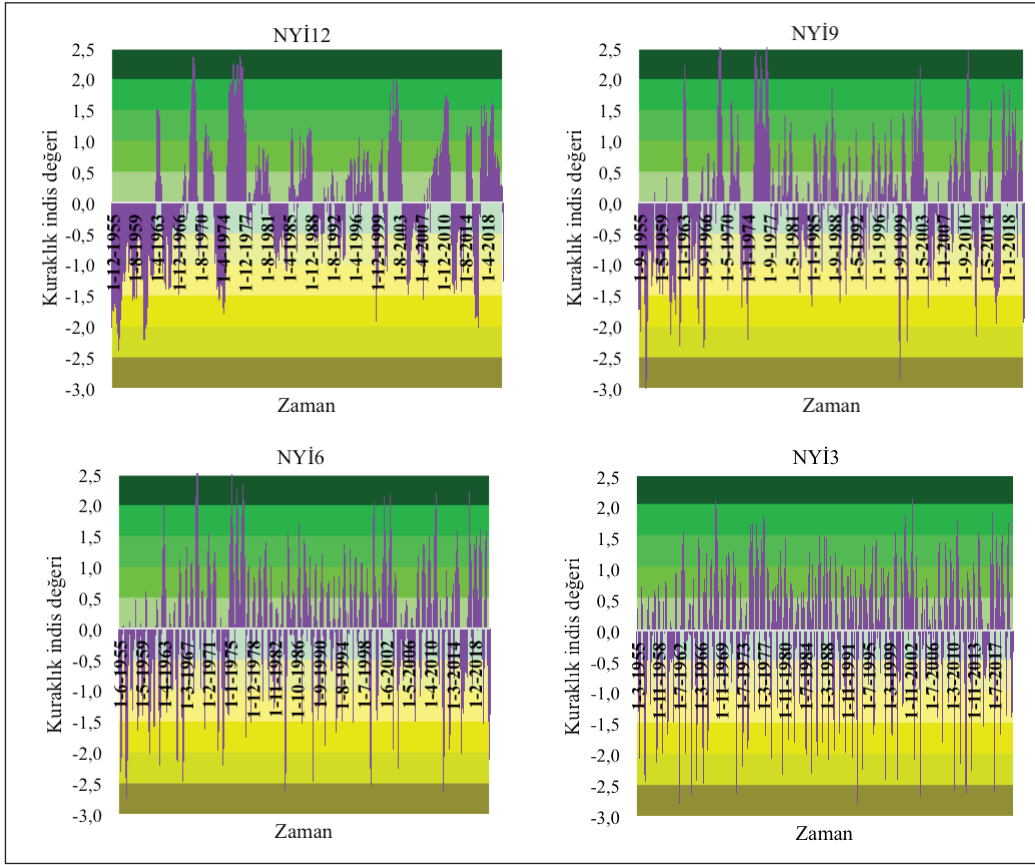
3.1. Kuraklık İndis Sonuçları

Bu bölümde kuraklık analizlerinden elde edilen NYİ ve AKİ bulguları verilmiştir. 3, 6, 9 ve 12 aylık yağış toplamlarından elde edilen NYİ3, NYİ6, NYİ9 ve NYİ2 sonuçları Şekil 5'de; AKİ3, AKİ6, AKİ9 ve AKİ12 sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.

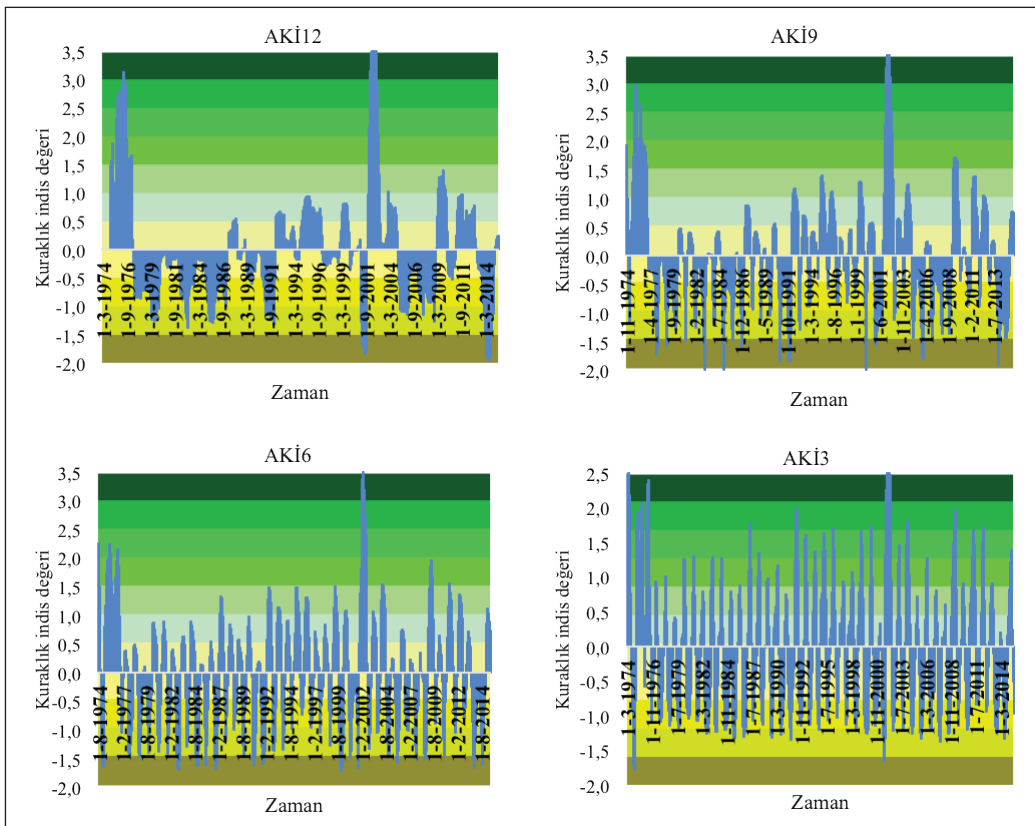
Kısa dönemleri için pozitif ve negatif değer geçişleri (sulak ve kurak dönemler sayısı) uzun dönemlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bütün NYİ analizlerinde aşırı kurak ($z < -2$) dönemler gözlemlenirken AKİ analizlerinde aşırı kurak dönemlerin sadece AKİ9'da Mart 1983, Mart 1985 ve Mart 2000 aylarında gözlemlenmiştir. NYİ12 için aşırı kurak dönemler Aralık 1956, Ocak 1957 ve Ekim 2016 olarak gözlemlenmiştir. NYİ12 için en fazla kuraklık Eylül 2001 ve Haziran 2014 aylarında şiddetli kuraklık ($-1.5 < z < -1.99$) olarak gözlemlenmiştir.

3.2. Trend Analiz Sonuçları

YŞTY, Apa Barajı bölgesinde uygulanmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 3'de ifade edilmiştir. Trend analizi yağış, akım, NYİ3, NYİ6, NYİ9, NYİ12, AKİ3, AKİ6, AKİ9, AKİ12 için uygulanmış ve önem parametresi %95 ($z=1.96$) olarak seçilmiştir. Çizelge 3'de tüm veri türlerinde %95 önem seviyesinde artan trend olduğu tespit edilmiştir. Hesaplanan s değerleri tüm verilerde, üst sınırın üzerinde olduğundan dolayı, bütün veri türlerinde artan trend gözlemlenmiştir. YŞTY



Şekil 5. Farklı zaman adımıyla NYİ sonuçlarının zamana göre dağılımı.

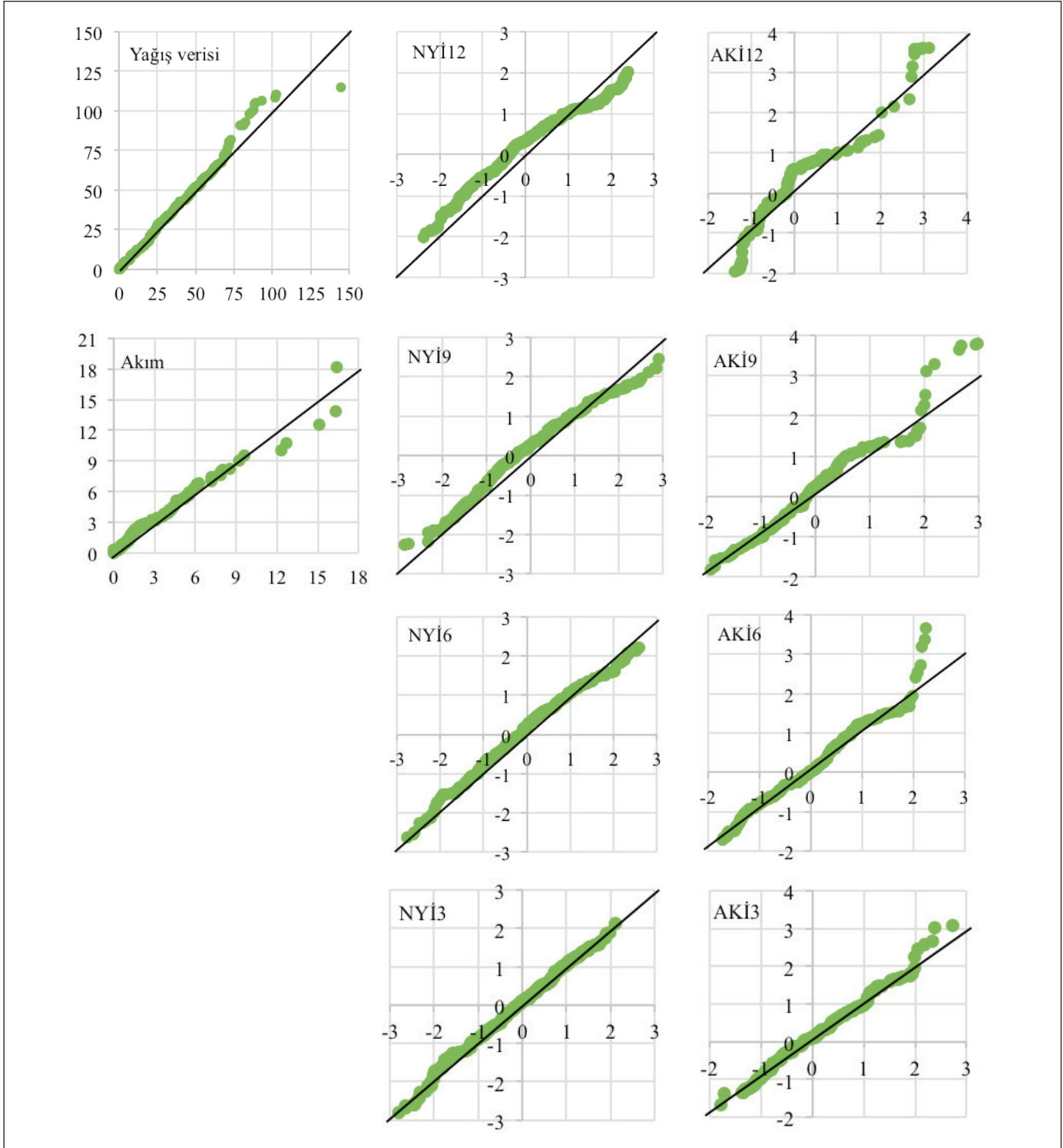


Şekil 6. Farklı zaman adımıyla AKİ sonuçlarının zamana göre dağılımı.

ile tüm verilerden elde edilen sonuçların grafikleri Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 7 incelendiğinde; meteorolojik kuraklıkları ifade eden NYİ12, NYİ9, NYİ6 değerlerinde kuraklıkların tüm kate-

gorilerinde ve orta sulak, çok sulak, aşırı sulak kategorinde azalan trend görülmektedir. NYİ3'te ise orta kurak hariç herhangi bir trend olmadığı görülmektedir. Orta kurak kategorisinde NYİ3'te bir azalma trendi görülmüştür. Hid-



Şekil 7. YŞTY ile tespit edilen sonuçlar.

rolojik kuraklık indisi olan AKİ incelendiğinde; AKİ12, AKİ9, AKİ6 ve AKİ3 aşırı sulak sınıfında artan bir eğilim olduğu görülmektedir. AKİ12 incelendiğinde; az sulak ve orta kurak dönemlerde artan ancak orta sulak, çok sulak ve az kurak dönemlerde azalan bir trend bulunmaktadır. AKİ9 incelendiğinde; çok sulak dönemde azalan, az sulak ve orta sulak dönemlerde artan bir eğime karşılık, çok kurak dönemde azalma görülmektedir.

MK sonuçları Çizelge 4'de verilmiştir. MK'den elde edilen sonuçlar, $\alpha=0.01$, $\alpha=0.05$ ve $\alpha=0.10$ önem seviyelerinde kritik z skorları sırasıyla $z=2.57$, $z=1.96$ ve $z=1.645$ ile değerlendirilmiştir. Sonuçlarda, akım ve yağış verilerinde istatistiksel olarak anlamlı bir trendin olmadığı bulunmuştur. Kuraklıklar değerlendirildiğinde ise, akım kuraklık indislerinden olan AKİ3, AKİ6 ve AKİ9'da bulunan trend istatistiksel

olarak anlamlı bulunmamıştır. Akım Kuraklık İndislerinden AKİ12 ve Normalleştirilmiş Kuraklık İndislerinden NYİ3'de $\alpha=0.05$ önem seviyesinde artan bir trend tespit edilmiştir. Bu yöntemde, NYİ ile hesaplanan kuraklık indislerinin tümünde (NYİ3 hariç), 0.01 düzeyinde önemli trendin olduğu belirlenmiştir. NYİ indislerinin tümünde tespit edilen trendlerin tamamı yine artan yöndedir.

Çizelge 5'de ise, Spearman Rho Trend Testi'nden yararlanılarak elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. MK da olduğu gibi Spearman's Rho testinde yağış ve akım verilerinde anlamlı bir trend bulunamamıştır. Ayrıca, akım kuraklık indislerinin tümünde AKİ12, AKİ9, AKİ6, AKİ3 anlamlı bir trend meydana gelmemiştir. Ancak, Spearman's Rho testine göre NYİ12, NYİ9 ve NYİ6'da 0.01 anlamlılık seviyesinde, NYİ3'de 0.10 anlamlılık seviyesinde artan trend bulunmuştur.

Çizelge 3. Yenilikçi Şen Trend Yöntemi sonuçları

Veri Türü	s	p	n	σ_s	Üst Sınır	Alt Sınır	Karar	Trend Yönü
Yağış	0.002930	0.994601	792	23.661992	0.000432	-0.000432	Evet	Artan
Akım	0.000701	0.989099	504	2.616341	0.000134	-0.000134	Evet	Artan
NYİ12	0.000592	0.987960	780	0.998603	0.000028	-0.000028	Evet	Artan
NYİ9	0.000505	0.990828	784	1.000619	0.000024	-0.000024	Evet	Artan
NYİ6	0.000356	0.995419	786	1.001120	0.000017	-0.000017	Evet	Artan
NYİ3	0.000214	0.998015	790	0.984035	0.000011	-0.000011	Evet	Artan
AKİ12	0.000866	0.963184	488	1.000482	0.000099	-0.000099	Evet	Artan
AKİ9	0.000735	0.985173	490	0.997605	0.000062	-0.000062	Evet	Artan
AKİ6	0.000520	0.988786	494	1.000141	0.000053	-0.000053	Evet	Artan
AKİ3	0.000380	0.996333	496	0.992563	0.000030	-0.000030	Evet	Artan

Çizelge 4. MK Trend Testi sonuçları.

Veri türü	Veri sayısı	MK z skoru	Karar	Trend Yönü
Yağış	792	1.3870	Hayır	-
Akım	504	0.7960	Hayır	-
NYİ12	781	7.8590	Evet	Artan***
NYİ9	784	6.2770	Evet	Artan***
NYİ6	787	4.1500	Evet	Artan***
NYİ3	790	2.4530	Evet	Artan**
AKİ12	488	2.0920	Evet	Artan**
AKİ9	491	0.2480	Hayır	-
AKİ6	494	0.0820	Hayır	-
AKİ3	497	0.2240	Hayır	-

Not: ***: $\alpha=0.01$ anlamlılık seviyesinde önemli, **: $\alpha=0.05$ anlamlılık seviyesinde önemli.

Çizelge 5. Spearman's Rho Trend Testi sonuçları

Veri türü	Veri sayısı	Spearman's Rho z skoru	Karar	Trend Yönü
Yağış	792	0.9610	Hayır	-
Akım	504	0.3860	Hayır	-
NYİ12	781	5.3560	Evet	Artan***
NYİ9	784	4.3710	Evet	Artan***
NYİ6	787	2.9500	Evet	Artan***
NYİ3	790	1.7600	Evet	Artan*
AKİ12	488	0.9360	Hayır	-
AKİ9	491	0.0650	Hayır	-
AKİ6	494	0.0980	Hayır	-
AKİ3	497	0.1790	Hayır	-

Not: ***: $\alpha=0.01$ anlamlılık seviyesinde önemli, * $\alpha=0.10$ anlamlılık seviyesinde önemli

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Türkiye'nin tarım, sulama ve tahıl ambarı olarak nitelendirilen, en önemli illerden biri olan Konya'nın Çumra ilçesinde yer alan Apa Barajına ait yağış, akım verilerinin ve bu verilerden elde edilen meteorolojik kuraklık ve hidrolojik kuraklığı temsil eden farklı zamanlara ait NYİ ve AKİ kuraklık indislerinin trendleri belirlenmiştir. Trend analizlerinde parametrik olmayan Mann-Kendall ve Spearman's Rho testlerine ilave olarak Yenilikçi Şen Trend Yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Yenilikçi Şen Trend Yöntemi'nde, %95 güven aralığında yağış, akım ve meteorolojik ve hidrolojik kuraklık indislerinde tespit edilen trend anlamlı ve trend yönü artan olarak bulunmuştur.
- MK test sonucunda; yağış ve akım verilerinde istatistiksel anlamlı trend bulunamamış, ancak NYİ6, NYİ9 ve NYİ12 indislerinde 0.01 anlamlılık seviyesinde önemli artan trend bulunmuş, hidrolojik kuraklık indislerinden AKİ12 ve meteorolojik kuraklık indislerinden NYİ3'de 0.05 anlamlılık seviyesinde artan trend tespit edilmiştir. Diğer hidrolojik kuraklık göstergeleri olan AKİ3, AKİ6 ve AKİ9'da ise anlamlı trend bulunamamıştır.
- Spearman's Rho testinde MK'da olduğu gibi yağış ve akım verilerinde trend tespit edilememiştir. NYİ6, NYİ9 ve NYİ12 göstergelerinde 0.01 anlamlılık seviyesinde, NYİ3 göstergesinde ise 0.10 anlamlılık seviyesinde artan trend bulunmuş, ancak AKİ3, AKİ6, AKİ9 ve AKİ12 göstergelerinde anlamlı trend bulunamamıştır.

Elde edilen bulgulardan yola çıkarak; özellikle YŞTY verilerinin analizinde geçmişten günümüze kadar birçok çalışmada kullanılan monotonik trend analizi yöntemlerine göre uygulayıcılar açısından daha kapsamlı sonuçlar verdiği görülmüş olup, bölgeye yakın istasyonlar eklenerek, ve bu istasyonlardan elde edilen sıcaklık, buharlaşma gibi verilerden faydalanılarak, farklı önem seviyelerinde bir trend analizi çalışması yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, YŞTY'de grafik gösteriminde, sulak ve kurak dönemlere ait trendler belirgin olarak tespit edilebilmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen bulguların incelenen bölge için su kaynakları yönetiminde, baraj havzalarının yönetiminde ve baraj yönetiminde karar verici mercilere yardımcı olacağı düşünülmektedir.

5. Teşekkür

Tüm yazarlar eşit oranda katkıya sahiptir. Tüm yazarlar makaleyi inceledi ve onayladı. Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler. Bu çalışmada etik izin gerekli değildir. Bu çalışma, sorumlu yazarlardan olan Türker Tuğrul'un doktora tezinden üretilmiştir. Ücretsiz olarak Veri temini sağlayan Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne bağlı Ankara Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'ne teşekkürlerimizi arz ederiz. Bu çalışma, Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında 2022-010 nolu proje ile desteklenmiş olup, gerçekleşmesinde katkıda bulunan Aksaray Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

6. Kaynaklar

- Aktürk, G., Yildiz, O. (2014).** Drought analysis for different time periods in the city of Kırıkkale (Turkey). *International Journal of Engineering Research and Development*, 6, 1-7.
- Bhunia, P., Das, P., Maiti, R. (2020).** Meteorological Drought Study Through SPI in Three Drought Prone Districts of West Bengal, India. *Earth Systems and Environment*, 4(1), 43-55. doi:10.1007/s41748-019-00137-6
- Dogan, S., Berktaş, A., ve Singh, V. P. (2012).** Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 470-471, 255-268. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.003
- Dracup, J. A., Lee, K. S., Paulson, E. G. (1980).** On the Definition of Droughts. *Water Resources Research*, 16(2), 297-302. doi:DOI 10.1029/WR016i002p00297
- Edwards, D.C. (1997).** Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Master thesis, Colorado State University, 155 pages.
- Gumus, V. (2019).** Spatio-temporal precipitation and temperature trend analysis of the Seyhan-Ceyhan River Basins, Turkey. *Meteorological Applications*, 26(3), 369-384. doi:https://doi.org/10.1002/met.1768
- Gumus, V., Simsek, O., Avsaroglu, Y., Agun, B. (2021).** Spatio-temporal trend analysis of drought in the GAP Region, Turkey. *Natural Hazards*, 109(2), 1759-1776. doi:10.1007/s11069-021-04897-1
- Guttman, N. B. (1999).** Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322. doi:DOI 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x
- Heim, R. (2002).** A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83. doi:10.1175/1520-0477(2002)083<1149:AROTDI>2.3.CO;2
- Hınıs, M. A. (2013).** Hydrometeorological Drought Analysis in Aksaray by Aggregate Drought Index. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(4), 711-721. Retrieved from <Go to ISI>://WOS:000330041500005
- Katipoğlu, M. O., Yesilyurt, N. S., Dalkılıç, Y. H. (2022).** Yeşilirmak havzasındaki hidrolojik kuraklıkların Mann-Kendall ve Yenilikçi Şen yöntemi ile trend analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 422-442. Doi:10.17714/gumusfenbil.1026893
- Kendall, M. G. (1948).** Rank correlation methods. Griffin, London, England.
- Lehmann, E. (1975).** Nonparametrics, Statistical Methods Based on Ranks. Inc, California: Holden -Day.
- Li, J., Wang, Z., Wu, X., Zscheischler, J., Guo, S., Chen, X. (2021).** A standardized index for assessing sub-monthly compound dry and hot conditions with application in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 1587-1601. doi:10.5194/hess-25-1587-2021
- Mann, H. (1945).** Nonparametric tests against trend. *Econometrica*.
- McKee, T. B., Dosken, N. J., Kleist, J. (1993).** The relationship of drought frequency and duration to time scales. Paper presented at the Eight Conference on Applied Climatology, Anaheim, California.
- Mert, R., Bulut, S., Solak, K. (2008).** Apa Baraj Gölü'nün (Konya) Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Araştırılması. *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1-10.
- Mishra, A.K., Singh, V.P. (2009).** Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. *J. Geophys. Res.* 114, D06120. doi:10.1029/2008JD010986.
- Nalbantis, I. (2008).** Evaluation of a Hydrological Drought Index. *Eur Water*, 23.
- Naz, F., Dars, G. H., Ansari, K., Jamro, S., Krakauer, N. Y. (2020).** Drought Trends in Balochistan. *Water*, 12(2), 470. Retrieved from https://www.mdpi.com/2073-4441/12/2/470
- Palmer, W. C. (1965).** Meteorological drought. Paper presented at the US Department of Commerce.
- Sen, Z. (2012).** Innovative Trend Analysis Methodology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9), 1042-1046. doi:10.1061/(ASCE)He.1943-5584.0000556
- Sen, Z. (2017).** Innovative trend significance test and applications. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(3-4), 939-947. doi:10.1007/s00704-015-1681-x
- Sharafati, A., Nabaei, S., Shahid, S. (2019).** Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *International Journal of Climatology*, 40. doi:10.1002/joc.6307
- Sneyers, R. (1990).** "On the Statistical Analysis of Series of Observations. *World Meteorological Organization*, 145, World Meteorological Organization.
- Thom, H. C. S. (1966)** Some Methods of Climatological Analysis. WMO Technical Note Number 81, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 53 pp.
- Tuğrul, T., Dogan, S., Dursun, S. (2019).** Güneydoğu Anadolu Bölgesindeki İllerin Kuraklık Analizi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(4), 705-712.
- White, D. H., Walcott, J. J. (2009).** The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review. *Crop & Pasture Science*, 60(7), 599-616. doi:10.1071/Cp08378

Williams, A., Cook, E., Smerdon, J., Cook, B., Abatzoglou, J., Bolles, K., Livneh, B. (2020). Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought. *Science*, 368, 314-318. doi:10.1126/science.aaz9600

WMO (2016). World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016: Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva.



Gaziantep İlinde Bazı Hava Kirleticilerinin Ölçümü, Modellenmesi ve Değerlendirilmesi

Measurement, Modeling and Evaluation of Some Air Pollutants in Gaziantep Province

Gökhan Yaman¹, Selman Türkeş², Hakan Güney^{2,*}, Ahmet Enver Sıvacı¹, Bülent Sarı², Olcayto Keskinan²

¹Gaziantep Büyükşehir Belediyesi, Çevre Koruma, Sıfır Atık ve İklim Değişikliği Daire Başkanlığı, Gaziantep, Türkiye

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde hazırlanan aynı isimli doktora tezinden üretilmiştir.

Öz

Kötü hava kalitesinin insan sağlığı üzerinde zararlı etkileri vardır ve havadaki kirlenme düzeylerinin belirlenmesi insan sağlığı ve çevre için önemlidir. Bu çalışmanın temel amacı, Gaziantep ilinin kış hava kirliliğini bazı parametreler (NO₂ ve SO₂) açısından analiz etmek ve alınması gereken önlemleri tartışmaktır. Bu kapsamda 2015-2020 yılları arasında belirlenen 30 noktanın her birinde 5 adet pasif örnekleme yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarının istatistiksel analizleri SPSS 17.0 V. programı kullanılarak yapılmış ve sonuçlar arasında anlamlı ilişkiler olduğu belirlenmiştir. SigmaPlot Versiyon 11.0 yazılımıyla sigmoid, lojistik, gompertz ve lineer modeller geliştirilirken, MATLAB R2020a programında ise lineer yapay sinir ağı (ANN) ve lineer olmayan yapay sinir ağı (NARX-ANN) kullanılarak kirlenme değerlerinin gelecek tahminleri gerçekleştirilmiştir. 2040 yılı için yapılan NO₂ ve SO₂ tahminlerinde en güvenilir sonuçlar lineer model ile elde edilmiş olup, kirlenme konsantrasyonları sırasıyla 50,91 µg/m³ (R²=0,9999) ve 168,48 µg/m³ (R²=0,9762) olarak hesaplanmıştır. Yapay sinir ağları ile geliştirilen modellerden NARX-ANN Bayesian düzenleme algoritmasının tahminler için daha uygun ve güvenilir olduğu görülmüştür (NO₂ için R²=0,8785, SO₂ için R²=0,9021). Lineer modele göre daha yüksek R² değerine sahip olmasına rağmen, NARX-ANN modeli tahmin hesaplamalarında meteorolojik verileri de dikkate aldığı için daha anlamlı görülmektedir. Çalışmanın sonunda Gaziantep hava kalitesinin iyileştirilmesi ve sürdürülebilirliği için öneriler sunulmuştur. Bunlar; kentsel dönüşüm ve şehir planlama ile nüfus yoğunluğunun homojen dağılımı, trafik yoğunluğunu azaltacak toplu ulaşım gibi altyapıların oluşturulması, alternatif temiz yakıtlara yönelik teşvik ve hibelerin artırılması, bilgi ve iletişimi bütünleştiren akıllı şehir konseptinin, iletişim teknolojileri ve sabit/mobil ölçüm sensörlerinin kurulmasıdır.

Anahtar Kelimeler: NO₂, SO₂, Pasif örnekleme, Modelleme, Yapay sinir ağı, Gaziantep

Abstract

Poor air quality has harmful effects on human health and determination of pollutant levels in the air is important for human health and the environment. The main purposes of this study are analyzing the winter air pollution of Gaziantep province in terms of some parameters (NO₂ and SO₂) and the discussing the necessary precautions to be taken. In this context, 5 passive samplings were made at each of the 30 points determined between 2015-2020. Statistical analyzes of the measurement results were made using the SPSS 17.0 V. program and it was determined that there were significant relationships between the results. While sigmoid, logistic, gompertz,

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: hkn_gny@hotmail.com

Gökhan Yaman orcid.org/0000-0003-3250-2278

Selman Türkeş orcid.org/0000-0001-6420-1002

Hakan Güney orcid.org/0000-0001-9560-8729

Ahmet Enver Sıvacı orcid.org/0000-0002-2132-5248

Bülent Sarı orcid.org/0000-0002-5171-9491

Olcayto Keskinan orcid.org/0000-0001-8995-756X



and linear models were developed with SigmaPlot Version 11.0 software, future predictions of pollutant values were made using linear artificial neural network (ANN) and non-linear artificial neural network (NARX-ANN) in MATLAB R2020a program. In the NO₂ and SO₂ estimations made for 2040, the most reliable results were obtained with the linear model, and the pollutant concentrations were calculated as 50.91 µg/m³ (R²=0.9999) and 168.48 µg/m³ (R²=0.9762), respectively. Among the models developed with artificial neural networks, NARX-ANN Bayesian regulation algorithm was found to be more suitable and reliable for predictions (R²=0.8785 for NO₂, R²=0.9021 for SO₂). Although it has a lower R² than the linear model, the NARX-ANN model is considered to be more meaningful because it also considers meteorological data in forecast calculations. At the end of the study, suggestions were presented for the improvement and sustainability of Gaziantep's air quality. These are the homogeneous distribution of population density by urban transformation and city planning, the creation of infrastructures such as public transportation that will reduce traffic density, the increase of incentives and grants for alternative clean fuels, and the establishment of a smart city concept integrating information and communication technologies and fixed/mobile measurement sensors.

Keywords: NO₂, SO₂, Passive sampling, Modeling, Neural network, Gaziantep

1. Giriş

Hızla gelişen teknoloji ve endüstrileşme ile yaşam kalitesi ve süresinin artması hedeflenmiş olsa da, sanayi faaliyetleri ve şehir merkezlerindeki yoğun nüfus artışı, kentsel hareketliliği ve fosil yakıtların kullanım oranını yükseltmiştir. Bunun neticesinde de ulaşım, sanayi ve ısınmadan kaynaklı hava kirliliği büyük ölçüde artmıştır (Kentair 2013, Karataş ve Kılıç 2017). Önemli hava kirleticilerden birisi SO₂'dir. Atmosferdeki SO₂'nin %60'ı insan aktiviteleri neticesinde oluşmaktadır (Greenpeace 2019). NO₂ ise özellikle ısınma ve sanayi amaçlı doğal gaz kullanımı ile ulaşımında kullanılan sıvı yakıtlardan kaynaklanmaktadır (Polat 2016).

Hem insan sağlığı hem de iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle hava kalitesinin iyileştirilmesi günümüzün öncelikli konuları arasında yer almaktadır. Kyoto Protokolü, Paris İklim Anlaşması ve Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı gibi girişimler bu öncelik sonucu ortaya çıkmış, başta iklim değişikliği ve kaynak kullanımı olmak üzere hava kalitesinin iyileştirilmesine de katkı sunulması hedeflenmiştir. Hava kalitesinin iyileştirilmesi için öncelikli olarak kirlenme ve miktarlarının tespiti (Cox 2003, Kocaman 2010), kaynakların belirlenmesi ve değerlendirilmesi (Doğan ve Kitapçıoğlu 2007, Kara 2016), tahmin modellerinin geliştirilmesi (Yüksek vd. 2007, Arabacı vd. 2010) ve buna göre önlemlerin alınması ve uygulanması gerekmektedir (Sümer 2014, Amini vd. 2017, Akben ve Demirel 2018, Aydoğdu 2021, WWF 2022).

Hava kirlenme emisyonlarının tahmini hem insanlara hem de izleyici ve denetleyici resmi kurumlara hava kalitesine ilişkin etkili veriler sağlayarak çevre kirliliği eğilimlerini önceden yansıtılabilir ve önlemler alınmasını kolaylaştırabilir (Li vd. 2021, Liu vd. 2021). Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR) (Ng ve Awang 2018), Yapay Sinir Ağı (YSA) (Cabaneros ve Hughes 2022) ve Derin Sinir Ağı (DNN) (Freeman vd.

2018) gibi veriye dayalı istatistiksel modeller kirlenme emisyonlarının tahmini için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Hava kirlenme konsantrasyonlarının tahmini için en çok kullanılan veriye dayalı araçlar arasında YSA modelleri gösterilmiştir (Irmak ve Aydılek 2019, Liu vd. 2021, Cabaneros ve Hughes 2022).

ANN, herhangi bir süreçte girdilerin etkisi ile çıktılarının performansı arasındaki ilişkiyi tanımlayan ve insan sinir sisteminden ilham alan istatistiksel bir modelleme tekniği olarak geliştirilmiştir (Gholizadeh vd. 2021, Benramdane vd. 2021, Sarı vd. 2022). ANN ile; önceden tasarım veya ayarlama olmaksızın mevcut verilerden model türetme (Sabour ve Amiri 2017, Asgari vd. 2020), kolay simülasyon, tahmin ve modelleme (Elmolla vd. 2010), sistem girdi ve çıktılarının eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç adımda etkileşimi (Radwan vd. 2018) ve uyarlanabilir yapısıyla performans tahmini (Talwar vd. 2019) mümkündür. NARX-ANN ise ısı eşanjörleri, atık su arıtma, üretim sistemleri, kimyasal prosesler, robotik ve havacılık gibi birçok sistemin analiz, simülasyon, izleme ve kontrol alanlarında kullanılmaktadır. Bu model gelecekteki hava kirlenme verileri tahmin etmek için kullanılan geçmiş verilerin bir tür dinamik filtreleme analizi olan bir zaman serisi uygulamasıdır (Cadenas vd. 2016, Boussada vd. 2018). Yöntemlerin avantaj ve dezavantajları literatürde kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır (Masood ve Ahmad 2021). YSA modellerinin avantajları; doğrusal olmayan verileri işleyebilmeleri, tüm girdileri, girdiler arası etkileşimleri, yan etkileşimleri hesaba katması ve büyük ölçekli veri hacimlerini kullanabilmesidir (Liu vd., 2021). Bu sayede, hava kirliliği modellenmesinde doğrusal olmama durumları ve etkileşimli ilişkilerle uğraşarak yaklaşımlarda daha yüksek doğruluk performansı sunabilirler (Zang vd. 2012). Modelleme sürecindeki en önemli dezavantaj ise model belirsizliği olarak ifade edilmiştir. Model belirsizliğinin, özellikle karar verme süreçlerinde YSA modellerinin kullanımını sınırla-

diği bildirilmiştir (Borrego vd. 2008). Dikkatli bir şekilde tasarlanmamış YSA modellerinin belirsizliği, model sonuçlarının tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini sınırlamaktadır (Arhami vd. 2013, Cabaneros ve Hughes 2022).

Bu çalışmaya konu olan Gaziantep 2000’li yıllardan itibaren gerek yerleşim ve ulaşım gerekse de sanayileşme açısından son derece hızlı büyüme ve gelişme kat eden bir şehirdir. İl genelinde hava kirliliği özellikle sonbahar, kış ve ilkbahar aylarının başlarında yoğun bir şekilde hissedilmektedir. Şehirde ısınma amaçlı doğalgaz kullanım oranının %58 olduğu bilinmektedir (GAZDAŞ 2022). Bu bağlamda, çalışmamızda öncelikle Gaziantep ilinde pasif örnekleme yöntemi kullanılarak NO₂ ve SO₂ kirleticili konsantrasyonları belirlenmiştir. Elde edilen verilerin neden sonuç ilişkilerinin değerlendirilmesinde istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Ayrıca geliştirilen modeller ile geleceğe yönelik kirleticili tahminlerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Bu kapsam ve amaç doğrultusunda Gaziantep hava kalitesinin iyileştirilmesi ve sürdürülebilirliği için yapılacaklarla ilgili önerilerde bulunulmuştur. Gaziantep hava kalitesinin tespiti ve geleceğe yönelik projeksiyonunun yapıldığı bu çalışma ile ülkemizde bu konudaki literatüre katkıda bulunulacağı ve araştırmacılar için veri sağlanacağı düşünülmektedir.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Hava Kalitesi İzleme Sahası

Gaziantep, gelişmiş sanayi ve ticaret altyapısının yanı sıra sınır kapısı kentlerinden biri olması nedeniyle hem bölgenin hem de ülkenin cazibe merkezi haline gelmiştir. Sanayi faaliyetlerinin ve nüfus hareketliliğinin yoğun olması şehrin merkezindeki hava kalitesinde önemli değişimler yaşanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle hava kalitesi izleme sahası olarak Gaziantep İl merkezi seçilmiştir.

Gaziantep il merkezi Şahinbey, Şehitkâmil ve Oğuzeli olmak üzere 3 merkez ilçeden oluşmaktadır. Dalgalı ve engebeli bir arazi yapısına sahip olan il merkezinin denizden yüksekliği 850 m’dir. Yüzey alanının %52’sini dağlar, %27’sini ise ovalar kaplamaktadır. İl genelinde Akdeniz ve karasal iklim etkileri hâkimdir. İlin 2021 yılı toplam nüfusu 2 milyonu aşmıştır ve bu nüfusun yaklaşık %85’i il merkezinde yaşamaktadır (TÜİK 2019). Şehirde ısınma amaçlı doğalgaz kullanım oranının %58 olduğu bilinmektedir (GAZDAŞ 2022). Ülkemizdeki en büyük sanayi sitesine sahip olan Gaziantep, 8 adet küçük sanayi sitesi ve 9 adet Organize Sanayi Bölgesi (OSB) ile sanayi ve ticaret alanında Türkiye genelinde 7. sıradadır (GSO 2022). Kent sınırları içinden geçen

E-90 ve D-400 karayolları bölgenin en önemli ulaşım akslarıdır (UAB 2020). Gaziantep genelinde 233,737 otomobil, 119,790 motosiklet, 91,152 kamyonet, 35,974 traktör, 18,918 kamyon, 4,203 otobüs, 13,350 minibüs ve 1,156 özel amaçlı araç bulunmaktadır (TÜİK 2019).

2.2. Hava Kirleticileri Örnekleme Noktaları

Gaziantep İl merkezinde hava kalitesinin belirlenmesi amacıyla şehir topografik yapısı, katı yakıt kullanım oranı, nüfus ve trafik yoğunluğu dikkate alınarak 30 örnekleme nokta seçilmiştir. Seçilen noktalarda 5 ölçüm süresince pasif örnekleme çalışmaları yürütülmüştür. Pasif örnekleme noktaları Şekil 1’de, ölçümlere ilişkin ayrıntılar ise Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Ölçümlere ilişkin ayrıntılar

Ölçümler	Ölçüm Yılları ve Ayları
1. Ölçüm	2015 Ocak, Şubat, Mart, Nisan
2. Ölçüm	2015 Ekim, Kasım, Aralık 2016 Ocak
3. Ölçüm	2016 Kasım, Aralık 2017 Ocak, Şubat, Mart, Nisan
4. Ölçüm	2017 Kasım, Aralık 2018 Ocak, Şubat, Mart, Nisan
5. Ölçüm	2019 Aralık 2020 Ocak Şubat Mart, Nisan, Mayıs, Haziran, Ekim, Kasım, Aralık

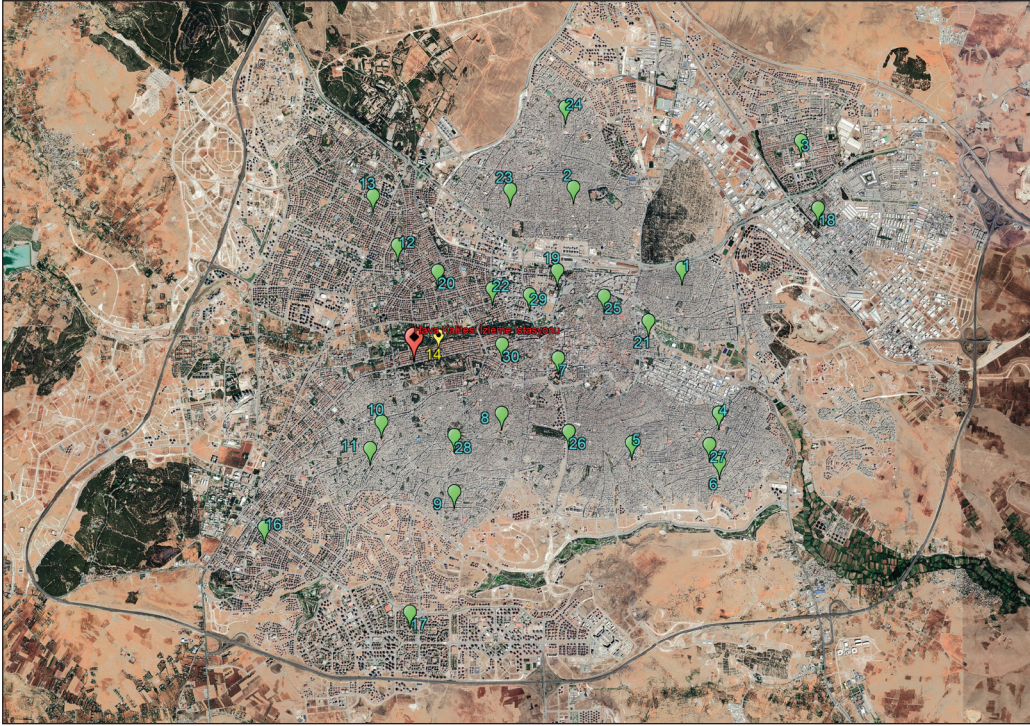
2.3. Pasif örnekleme

Belirlenen 30 örnekleme noktasından ayda iki kez pasif örnekleme yöntemi ve tüpleri (Çizelge 2) kullanılarak hava kalitesi numuneleri toplanmıştır (TS EN 13528 2022). Numunelerdeki NO₂ ve SO₂ Gradko Environmental Ltd. Laboratuvarı (İngiltere) tarafından iyon kromatografi cihazı (Dionex ICS 1100 ICU10, Thermo Fisher Scientific Inc. USA) ile analiz edilmiştir. Toplamda 1308 adet ölçüm yapılmış olup, 654 adedi NO₂ ve 654 adedi SO₂’dir.

2.4. İstatistik Analiz

Ölçüm yılları ve aylarındaki pasif örnekleme sonuçlarının izlenmesi ve değerlendirilmesi amacıyla tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. ANOVA hesaplamalarında kullanılan denklemler Eşitlik 1, 2, 3’de verilmiştir (Şenoğlu ve Acıtaş 2010).

$$SS_{Toplam} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (1)$$



Şekil 1. Pasif örnekleme noktaları.

Çizelge 2. Pasif örnekleme yöntemi ve tüpleri (TS-EN 13528)

Pasif Örnekleme Tüplerinin Özellikleri		
Difüzyon Tüpü Özellikleri	NO ₂	SO ₂
Örnekleme Tipi	Pasif Örnekleme Tüpü	Pasif Örnekleme Tüpü
Difüzyon Katsayısı (cm ² /saniye)	0.154	0.123
Alım Oranı (cm ³ /dakika)	0.89 ^b	9.56 ^c
Örneklemenin Bir Haftada Alabileceği Limit Değer (µg/m ³)	0.400	5.0
Örnekleme Stabilitesi	6 ay	2 ay
Numune Saklama Koşulu	Oda Sıcaklığı	Oda Sıcaklığı
Difüzyon Malzemesi	Triethanolamine	Sodyum Karbonat
Analiz Metodu	İon Kromatografisi	İon Kromatografisi
Ölçüm Standartı	DIF 100 RTU EN13528-1 EN13528-2 EN13528-3	DIF 600 RTU EN13528-1 EN13528-2 EN13528-3
b: Teorik olarak belirlenmiştir.		
c: Deneysel olarak belirlenmiştir.		

$$SS_{Gruplar\ arası} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2)$$

$$SS_{Gruplar\ içi} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (3)$$

Eşitlik 1, 2, 3'de, y_{ij} ; i denemedeki j gözlem değerini, $\bar{y}_{..}$; tüm gözlemlerin ortalamasını, $\bar{y}_{i.}$; i denemedeki gözlemlerin ortalamasını ifade etmektedir.

Yıllar arasındaki farklılığın istatistiksel olarak önemli olup olmadığı seçilen hata payı ($\alpha=0,05$) ile hesaplanan önem seviyesi (p) karşılaştırılarak belirlenmektedir. Eğer p değeri, α değerinden küçükse yıllar arasındaki fark istatistiksel olarak önemlidir.

Çoklu karşılaştırma testlerinden biri olan Tukey testi, varyans analizinde yıllar arası farklılık bulunduğu koşullarda; hangi yılın veya yılların daha etkili olduğunun tespiti için yapılmaktadır. Tukey testi hesaplamasında kullanılan denklem Eşitlik 4'te verilmiştir (Bülbul 2000).

$$Tukey = (q_k) \left[\sqrt{\frac{MSW}{n}} \right] \quad (4)$$

Eşitlik 4'te, q; örneklem dağılımı, k; karşılaştırılan ortalama katsayısı/düzyer sayısını, n; gözlem sayısını, MSW; açıklanamayan varyansı göstermektedir.

NO₂ ve SO₂ arasındaki ilişkiyi tespit etmek için kullanılan Pearson korelasyon katsayısı ise Eşitlik 5'te verilmiştir (Havlice ve Peterson 1977).

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

Eşitlik 5'te, r_{xy} ; X ve Y arasındaki korelasyon katsayısını, n; örneklem büyüklüğünü, X_i ; i gözleme ait X değerini, Y_i ; i gözleme ait Y değerini, \bar{X} ; X değerlerinin ortalamasını, \bar{Y} ; Y değerlerinin ortalamasını göstermektedir. Tek yönlü varyans analizi ve korelasyon analizi için SPSS 17.0 V. paket programı kullanılmıştır.

2.5. Model Geliştirme

2.5.1. Sigma Plot sürüm 11.0 Kullanılarak Geliştirilen Modeller

SigmaPlot sürüm 11.0 kullanılarak NO₂ için üç parametrelili sigmoid, üç parametrelili gompertz ve lineer model; SO₂ için ise üç parametrelili sigmoid, üç parametrelili lojistik, üç parametrelili gompertz ve lineer modeller kullanılmıştır. Modellerin karşılaştırılmasında kriter olarak belirtme katsayısı (R²) kullanılmıştır. Üç parametrelili sigmoid, üç parametrelili gompertz, lineer model ve üç parametrelili lojistik model denklemleri sırasıyla Eşitlik 6, 7, 8, 9'da verilmiştir (Oda vd.

2016).

$$y = \frac{a}{(1 + e^{-\frac{x-x_0}{b}})} \quad (6)$$

$$y = a * e^{-e^{-\frac{x-x_0}{b}}} \quad (7)$$

$$y = ax + b \quad (8)$$

$$y = \frac{a}{(1 + \frac{x}{x_0})^b} \quad (9)$$

Eşitlik 6, 7, 8, 9'da y; tahmin verilerini, x; zaman periyodunu, a ve b; denklem katsayılarını, e ise log fonksiyonunu göstermektedir.

2.5.2. Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Geliştirilen Modeller

Çalışmada ve modellemede kullanılan meteorolojik veriler ölçümlerin yapıldığı dönemde (2015-2020) kış mevsiminde ölçülmüş 5 parametre (Nispi Nem, Sıcaklık, Toplam Güneşlenme Süresi, Toplam Yağış, Yağışlı Gün Sayısı) olarak Gaziantep Meteoroloji İl Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Modellerde rüzgar verisi kullanılmamıştır. Meteorolojik veriler, NO₂ ve SO₂ pasif örnekleme sonuçları kullanılarak ANN ve-NARX-ANN modelleri geliştirilmiştir. Meteorolojik verilerin ortalaması Çizelge 3'de verilmiştir. ANN ve NARX-ANN modellerinin geliştirilmesinde MATLAB R2020a (MathWorks 2020) kullanılmıştır.

Geliştirilen modellerde 1200 (8*150) girdi ve 900 (6*150) çıktı olacak şekilde Levenberg-Marguardt (trainlm), Scaled Conjugate Gradient (trainscg) ve Bayesian Regularization (trainbr) algoritmaları uygulanmıştır. Veri setleri, Levenberg-Marguardt (trainlm), Scaled Conjugate Gradient (trainscg) algoritmaları için %70 Eğitim, %15 Test ve %15 Doğrulama; Bayesian Regularization (trainbr) algoritması için %85 Eğitim, %15 Test olacak şekilde düzenlenmiştir. Modellerde 1000 epoch (iterasyon) sayısı seçilmiştir (Arabacı vd. 2010). Geliştirilen ANN ve NARX-ANN model hücre yapıları sırasıyla Şekil 2 ve 3'te verilmiştir.

ANN ve NARX-ANN modelleri Eşitlik 10, 11, 12 ve 13'e göre geliştirilmiştir (Bishop 1995, Zhang vd. 2020, Di Nunno ve Granata 2020, MathWorks 2020).

$$\Delta w = [J^T(w)J(w) + \lambda I]^{-1} J^T(w) e(w) \quad (10)$$

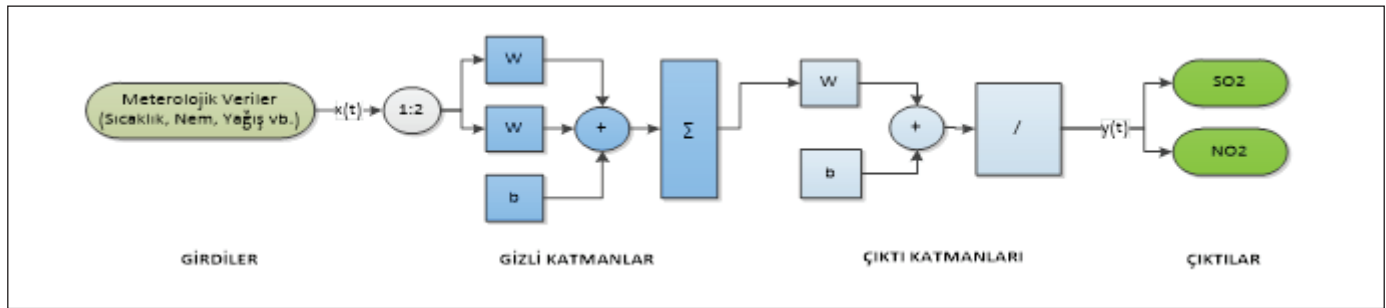
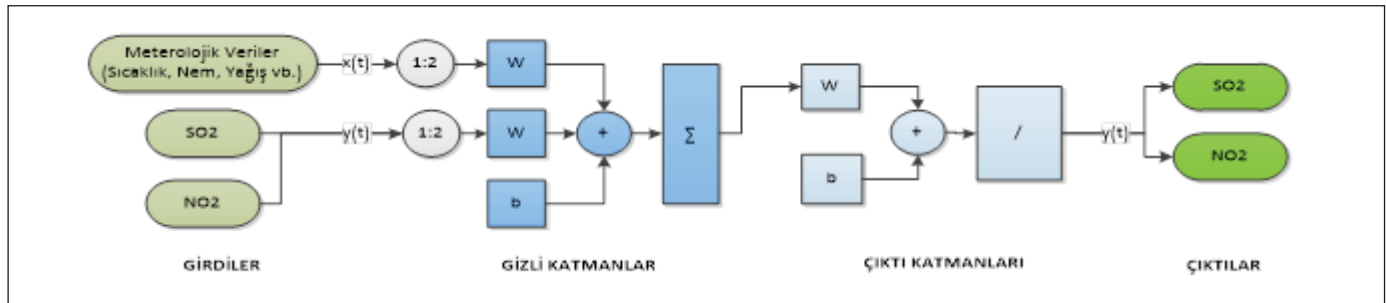
$$\Delta w = w_k - w_{k-1} = \alpha_k d_{k-1} \quad (11)$$

$$y(t) = f(x(t-1), \dots, x(t-d), y(t-1), \dots, y(t-d)) \quad (12)$$

$$y = \frac{(y_{\max} - y_{\min})(x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} + y_{\min} \quad (13)$$

Çizelge 3. Yıllara göre ortalama meteorolojik veriler.

Yıllar	Yıllık Ortalama Maksimum Nispi Nem (%)	Yıllık Ortalama Nispi Nem (%)	Yıllık Ortalama Minimum Sıcaklık (°C)	Yıllık Ortalama Maksimum Sıcaklık (°C)	Yıllık Ortalama Sıcaklık (°C)	Yıllık Ortalama Toplam Güneşlenme Süresi (saat)	Yıllık Ortalama Toplam Yağış (mm)	Yıllık Ortalama Yağışlı Gün Sayısı
2014	89.92	50.37	6.28	28.43	16.84	59.83	35.53	5.83
2015	88.67	51.38	6.91	28.18	16.25	197.10	50.88	11.00
2016	89.42	46.73	5.54	28.73	16.73	206.48	39.20	5.75
2017	87.42	46.83	6.63	28.75	16.71	215.61	29.87	5.67
2018	89.50	53.72	7.64	29.02	17.39	102.85	64.05	8.33
2019	88.67	53.17	7.20	28.91	16.73	-	62.65	8.08
2020	86.75	49.17	6.58	28.82	17.06	-	40.12	6.25

**Şekil 2.** Geliştirilen ANN modeli hücre yapısı (Akbulut ve Özcan 2020).**Şekil 3.** Geliştirilen NARX-ANN modeli hücre yapısı (Heidari vd. 2020).

Eşitlik 10'da, w ağırlık vektörünü, J Jacobian matrisini, J^T devriği, I_w kimlik matrisini, e hata vektörünü ve λ öğrenme sabitini ifade etmektedir. Eşitlik 11'de, k iterasyon indeksi, α_k k iterasyonundaki adım uzunluğu ve d_{k-1} ise arama yönü olarak tanımlanmıştır. Eşitlik 12'de ise ileri ve geri beslemeli modellerde doğrusal olmayan fonksiyonu, $x(t-d)$ girdi, $y(t-d)$ çıktı değerini belirtmektedir. Çalışmada etkin sonuçlar elde etmek için girdi-çıkı verileri (-1,1) aralığındaki

“mapminmax” ölçeklendirme optimizasyonu Eşitlik 13'e göre geliştirilmiştir. Burada, x_{\max} ve x_{\min} , verilerdeki maksimum ve minimum değerleri ifade ederken y_{\max} ve y_{\min} ise sırasıyla 1 ve -1 aralığındaki değerleri almaktadır. Geliştirilen her iki modelde de tahmin edilen değerlerin güvenilirliği ve uygunluğunu değerlendirmek için R^2 ve MSE değerleri dikkate alınmıştır (Bararpour vd. 2018, Kalantary vd. 2019).

3. Araştırma Bulguları ve Tartışma

3.1. Ölçüm Sonuçları

2015-2020 yılları arasında ölçülen en düşük ve en yüksek NO₂ ve SO₂ ölçüm değerleri Çizelge 4'te verilmiştir. En yüksek ölçüm sonuçları NO₂ için, 2017 yılı Kasım-Aralık periyodunda ve 7. Nuktada 86.84 µg/m³, SO₂ için ise yine 2017 yılının Kasım-Aralık periyodunda 2. Nuktada 553.33 µg/m³ olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4. Ölçülen en düşük ve en yüksek NO₂ ve SO₂ ölçüm değerleri.

Örnekleme Noktaları	En Düşük (µg/m ³)		En Yüksek (µg/m ³)	
	NO ₂	SO ₂	NO ₂	SO ₂
1	4.15	3.47	56.26	132.59
2	27.53	2.92	53.06	553.33
3	20.23	2.92	44.21	164.81
4	8.24	7.03	53.02	204.06
5	9.5	4.65	56.94	466.66
6	5.65	6.55	48.96	162.56
7	9.69	6.55	86.84	87.07
8	8.99	8.72	51.98	108.06
9	11.13	6.52	52.04	283.52
10	6.08	4.11	52.25	75.46
11	7.83	6.44	84.85	101.66
12	4.83	1.57	53.5	30.67
13	4.84	2.92	46.23	32.01
14	9.79	2.92	49.53	60.61
15	8.37	3.28	40.65	18.13*
16	5.82	3.17	53.84	33.61
17	5.18	2.18	38.21*	20.17
18	7.86	2.92	45.68	21.87
19	1.57	2.02	48.44	35.95
20	7.04	3.92	44.82	50.67
21	2.4	3.59	54.12	96.17
22	4.28	4.5	46.92	68.83
23	4.4	3.86	46.87	107.73
24	2.8	4.26	49.84	105.87
25	1.78	1.92	49.24	91.94
26	2.1	3.52	63.83	168.12
27	2.27	2.27	71.98	158.1
28	2.6	1.07	53.62	116.26
29	2.37	3.24	61.33	35.74
30	30.67	28.65	55.82	62.26

*HKDYY sınır değer aşımı olmayan ölçüm sonuçları

Çizelge 4.'teki ölçüm sonuçları 2015-2020 yıllarındaki Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği (HKDYY) kış dönemi sınır değerleri ile (NO₂ için: 56-40 µg/m³; SO₂ için 20 µg/m³) kıyaslanmıştır. Çizelge 4.'ten görüleceği üzere hem NO₂ için hem de SO₂ için 30 örnekleme noktasından 29'unda sınır değer aşımı söz konusudur. SO₂ açısından sınır değerlerin 2 ile 10 kat arasında aşıldığı görülmektedir. Özden vd. (2008) şehirlerdeki kötü hava kalitesinde NO₂'nin trafik, SO₂'nin ise genellikle ısınma amaçlı kömür kullanımından kaynaklandığını bildirmiştir. Benzer bulgular ve tespitler Polat (2016), Cansaran (2017), Battista (2017), Bozkurt vd. (2018), Ielpo vd. (2019) tarafından yayınlanan raporlarla da örtüşmektedir. En yüksek ölçümlerin 2017 yılında elde edilmesi, kış mevsiminin soğuk geçmesi ve bu nedenle de kalitesiz katı yakıt kullanımının artması ile açıklanabilmektedir (Gaziantep Çevre Durum Raporu 2020). Gaziantep'in hızlı gelişimi ve artan nüfusu nedeniyle şehrin neredeyse tüm bölgelerinde araç trafiği yoğunluğu oldukça fazladır ve bu durum 29 ölçüm noktasında NO₂ ölçüm sonuçlarının sınır değeri aşmasının temel nedeni olarak görülmektedir. Bunun yanında bakımsız, sıvasız, yalıtımsız ve bitişik nizam yapılar, şehir içinde hava koridorları oluşturacak planlamanın bulunmaması, kalitesiz katı yakıt tüketimi gibi etkenler nedeniyle sınır değerlerin çok üzerinde SO₂ ölçüm sonuçları elde edilmiştir.

3.2. Ölçüm Sonuçlarının İstatistiksel Değerlendirilmesi

Pasif örnekleme ile belirlenen NO₂ ve SO₂ konsantrasyonlarının yıllara göre değişimlerinin farklı olup olmadığını belirlemek için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Analizde ölçülen uç değerlerin hata payı oluşturacağı düşünüldüğü için hesaplamalara dâhil edilmemiştir. ANOVA sonuçları NO₂ ve SO₂ için sırasıyla Çizelge 5 ve 6'da verilmiştir.

Çizelge 5. NO₂ verilerinin ANOVA analizi.

	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	F	Önem Seviyesi (p)
Gruplar arası	369.53	3	1.28	0.278
Gruplar içi	43,125.86	451	-	-
Toplam	43,495.39	454	-	-

Çizelge 6. SO₂ Verilerinin ANOVA Analizi

	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	F	Önem Seviyesi (p)
Gruplar arası	30,878.1	3	4.28	0.005
Gruplar içi	1,090,909.8	454	-	-
Toplam	1,121,787.9	457	-	-

Çizelge 5'ten görüleceği üzere NO₂'nin yıllara göre değişimi istatistiksel olarak anlamlı değildir (p>0.05). SO₂'nin yıllara göre değişimi ise istatistiksel olarak anlamlı (p<0.05) bulunmuştur (Çizelge 6). SO₂ anlamlılığının değerlendirilmesi amacıyla çoklu karşılaştırma testi olarak Tukey testi uygulanmıştır (Çizelge 7).

Çizelge 7. SO₂ verilerinin tukey çoklu karşılaştırma analizi.

Yıllar	N (Gözlem Sayısı)	$\alpha = 0.05$ (Alfa alt kümesi)	
		1	2
2015	85	33.3320	
2016	89	36.3285	
2017	141		53.7613
2018	143	48.5397	48.5397

Çizelge 7'de verilen Tukey testi sonuçlarına göre SO₂'nin en yoğun olduğu yıl 2017'dir. 2017 yılında SO₂ konsantrasyonunda bir artış tespit edilmiştir ve bu artışın o yıl şehre giren kaçak ve kalitesiz kömür kullanımı ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır (Gaziantep Çevre Durum Raporu 2020).

Çalışmada incelenen NO₂ ve SO₂ arasındaki ilişki Çizelge 8 ile verilmiştir.

Çizelge 8. NO₂ ve SO₂ parametreleri arasındaki korelasyon

		SO ₂	NO ₂
SO ₂	Pearson Korelasyon Katsayısı	1	0.363**
	p	-	0.000
	N	458	455
NO ₂	Pearson Korelasyon Katsayısı	0.363**	1
	p	0.000	-
	N	455	455

**p<0.01.

Çizelge 8'de, NO₂ ve SO₂ arasında istatistiksel olarak anlamlı (p<0.01) ve pozitif bir korelasyon (r=0.363) olduğu görülmektedir. Bu pozitif korelasyon, özellikle kış mevsiminde evsel ısınma amacıyla kullanılan fosil yakıtların ve trafik yoğunluğunun artışı ile ilişkilendirilmektedir. Havaların soğuması ile ısınma amaçlı kullanılan doğalgaz ve kömür kullanımının artması aynı zamanda ulaşım amacı ile motorlu araçların tercih edilmesi hem NO₂ hem de SO₂'nin aynı süreçte artmasına neden olmaktadır (Gümrükçüoğlu ve Soylu 2011, Akyürek 2012).

Ayrıca bu çalışmada, Gaziantep'te bulunan hava kalitesi izleme istasyonu aktif ölçüm verileri (SO₂ ve PM₁₀) ile istasyona en yakın olan pasif örnekleme verileri (SO₂) arasındaki ilişkiyi tespit etmek için Pearson korelasyon testi yapılmıştır ve sonuçlar Çizelge 9'da verilmiştir. Karşılaştırmada, Şekil 1'de konumları ve koordinatları verilen izleme istasyonu ile bu noktaya en yakın pasif örnekleme noktası olan 14 nolu noktanın ölçüm sonuçları kullanılmıştır.

Korelasyon testi sonuçlarına göre aktif istasyon SO₂ ve PM₁₀ parametreleri arasında istatistiksel olarak anlamlı (p<0.05) ve pozitif bir ilişki (r=0.521) olduğu görülmüştür. Ancak aktif istasyon SO₂ ile pasif örnekleme SO₂ parametreleri arasında istatistiksel olarak anlamsız bir ilişki görülmüştür (p>0.05). Aktif istasyon PM₁₀ ile pasif örnekleme SO₂ parametreleri arasında ise istatistiksel olarak anlamlı (p<0.01) ve pozitif bir ilişki (r=0.621) tespit edilmiştir. Aktif ve pasif örnekleme SO₂ ölçümleri arasındaki anlamsızlık; ölçüm yöntemlerinin farklı olması, rüzgar hızı, yönü ve aktif istasyon ile pasif ölçüm noktasının (14 nolu nokta) aynı alanı temsil etmemesi gibi nedenlerden kaynaklanabilir. SO₂ ve PM₁₀ konsantrasyonları arasındaki doğrusal ilişki ise ısınma amacı ile kömür kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü kömürün yanması ile birlikte kirlenici gazların yanı sıra partikül maddeler de açığa çıkmaktadır (Kunt 2014, Sarı ve Esen 2019). Literatürde pasif örnekleme sonuçları ile aktif-sabit izleme istasyonları arasında güçlü bir ilişki olduğu bildirilse de (Rosario vd. 2016, Üzmez vd. 2017, Dokuz vd. 2020) bu çalışmada benzer sonuca ulaşılamamıştır. Çünkü karşılaştırılan ölçüm sonuçları aynı bölgeyi temsil eden noktalarda, aynı periyotlarda ve aynı anda elde edilmemiştir.

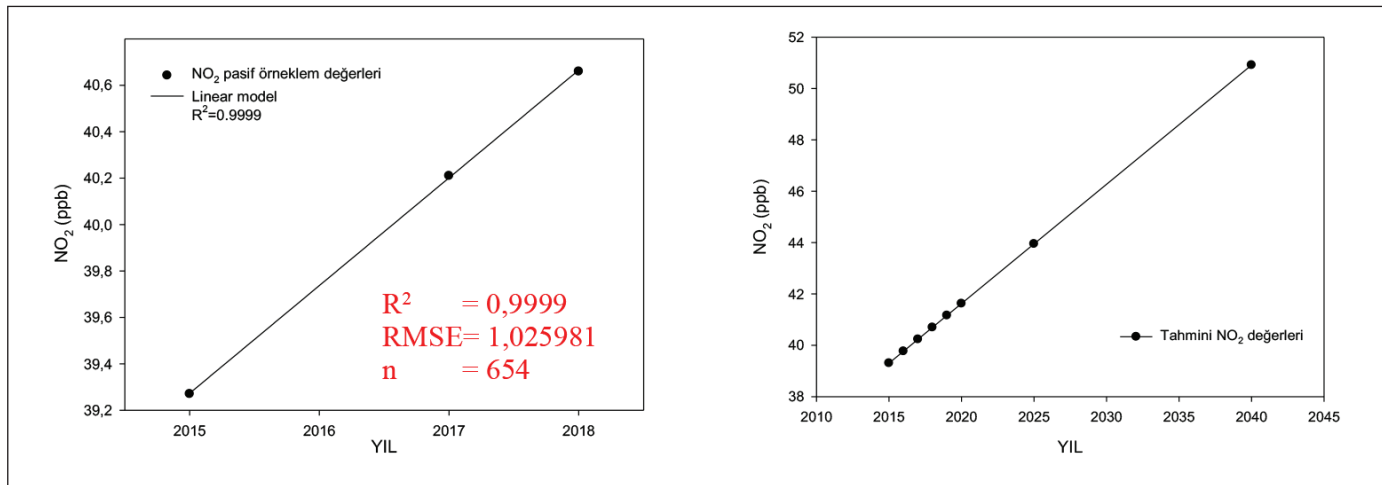
3.3. SigmaPlot Sürüm 11.0 ile NO₂ ve SO₂ Projeksiyonu

NO₂ ve SO₂ parametrelerinin yıllara göre değişiminden yararlanılarak kirlilik yüklerinin gelecek yıllardaki projeksiyonu için SigmaPlot Sürüm 11.0 ile 4 farklı model (Sigmoid, Lojistik, Gompertz ve Lineer) kullanılmıştır. Modellerin karşılaştırılmasında performans kriteri olarak R² değerleri

Çizelge 9. Aktif istasyon verileri ile pasif örnekleme verilerinin korelasyonu.

İstasyon SO ₂		İstasyon SO ₂	İstasyon PM ₁₀	Pasif Örn. SO ₂
	Pearson Korelasyon Katsayısı	1	0.521*	0.316
p		0.013	0.152	
N	22	22	22	
İstasyon PM ₁₀	Pearson Korelasyon Katsayısı	0.521*	1	0.621**
	p	0.013		0.002
	N	22	22	22
Pasif Örnekleme SO ₂	Pearson Korelasyon Katsayısı	0.316	0.621**	1
	p	0.152	0.002	
	N	22	22	22

*p<0.05; **p<0.01.

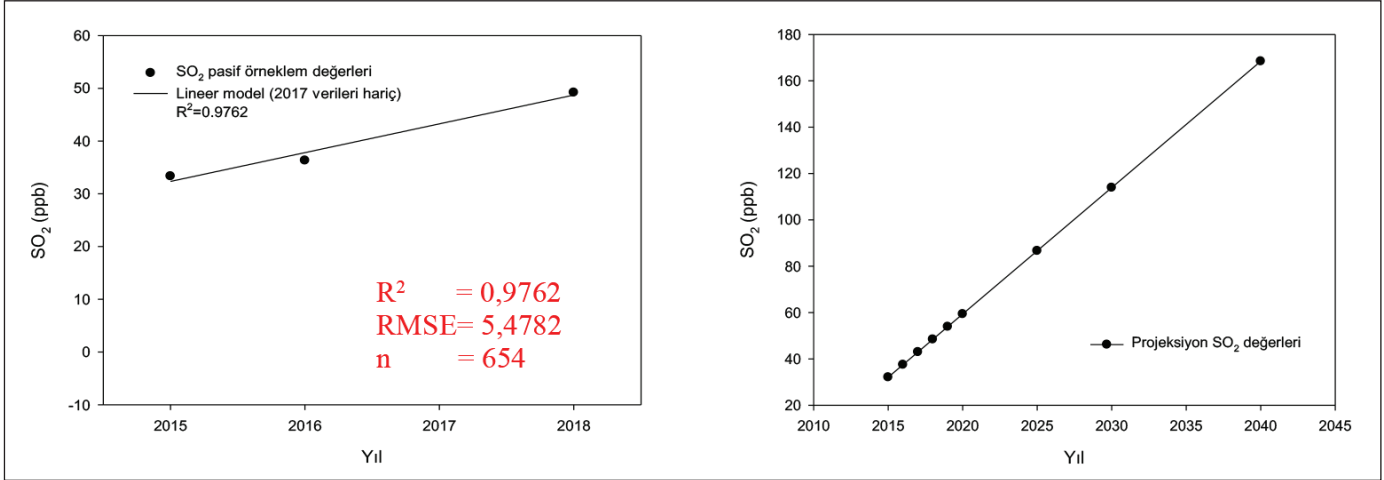
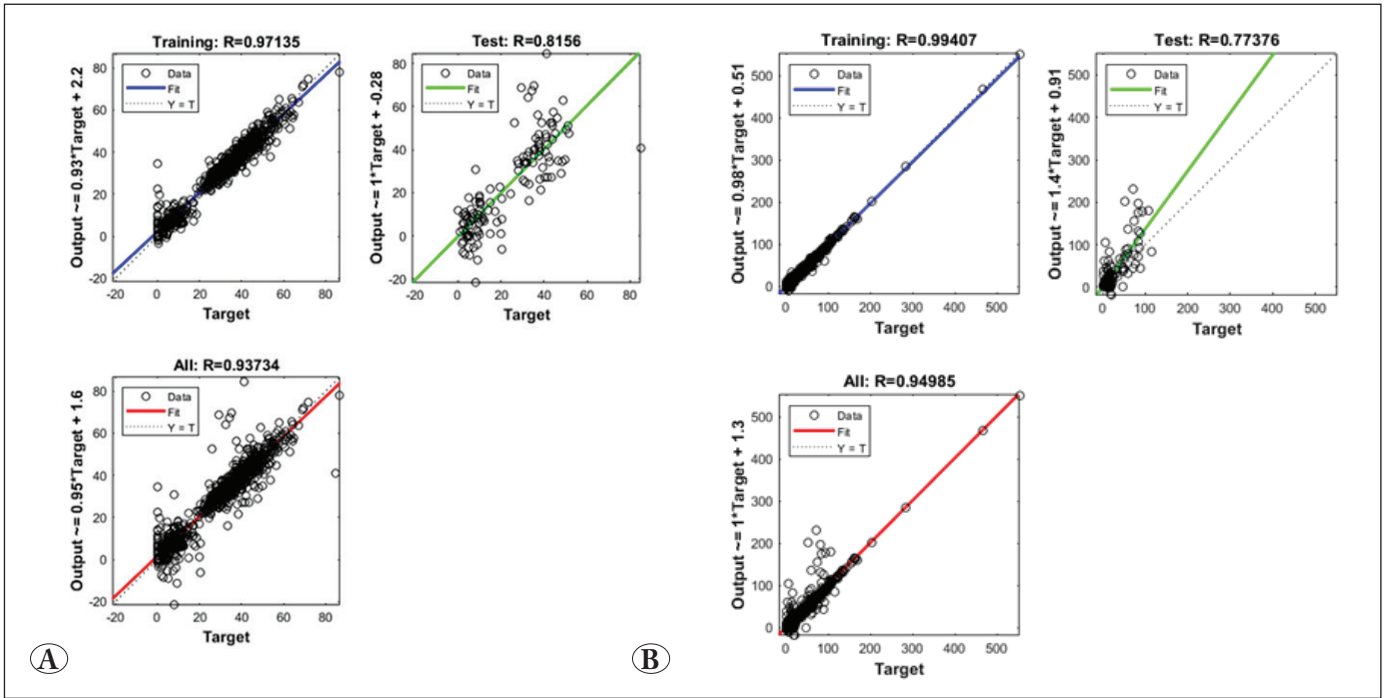
**Şekil 4.** Lineer Model ile NO₂ Projeksiyonu.

dikkate alınmıştır. Kullanılan modeller içerisinde en yüksek güven aralığı Lineer modeller ile elde edilmiştir. Lineer modellerin R² değerleri, NO₂ ve SO₂ için sırasıyla 0.9999 ve 0.9762'dir (Şekil 4 ve 5). Özellikle 2016-2017 kış mevsiminin aşırı soğuk geçmesi, bu dönemde kaçak ve kalitesiz kömür kullanımı (Gaziantep Çevre Durum Raporu 2020) sonucunda aşırı yükselen kirlenit konsantrasyonları yüksek hata paylarına sebep olacağından (Üzmez vd. 2017, Kunt 2014) hesaplamalarda kullanılmamıştır. Şekil 4 ve 5'te de görüleceği üzere 2040 yılı için yapılan projeksiyonda NO₂ ve SO₂ konsantrasyonları sırasıyla 50.91 µg/m³ ve 168.48 µg/m³ olarak tahmin edilmiştir. Bu sonuçlar Gaziantep hava kalitesi için endişe verici olmakla birlikte önlem alınması için de bir fırsat sunmaktadır. Temiz yakıtla çalışan toplu ulaşım araçlarının ve kullanımının yaygınlaştırılması, ısınma amaçlı doğal gaz kullanımının artırılması ve şehirde yeni

hava koridorlarının oluşturulması bu fırsatlar arasında sayılabilir.

3.4. ANN ve NARX-ANN ile NO₂ ve SO₂ Projeksiyonu

NO₂ ve SO₂ kirlenit konsantrasyonlarının projeksiyonu için MATLAB R2020a matematiksel yazılım programı ile geliştirilen ANN ve NARX-ANN modellerinin karşılaştırılmasında, NARX-ANN modeline ait Bayesian Regularizasyon (trainbr) algoritması ile elde edilen tahminlerin daha güvenilir olduğu belirlenmiştir. Şekil 6a ve 6b'de NARX-ANN modeline ait Bayesian Regularization (trainbr) algoritması NO₂ ve SO₂ için en etkin sonuçları vermiştir. Geliştirilen modeller için oluşturulan grafiklerde "X" eksenini deneysel verilerden, "Y" eksenini tahmini değerlerden oluşmaktadır. "Fit çizgisi" girdi verileri ile tahmini değer arasındaki ilişkiyi göstermektedir. "Y=T" çizgisi gerçek değer ile tahmini değer

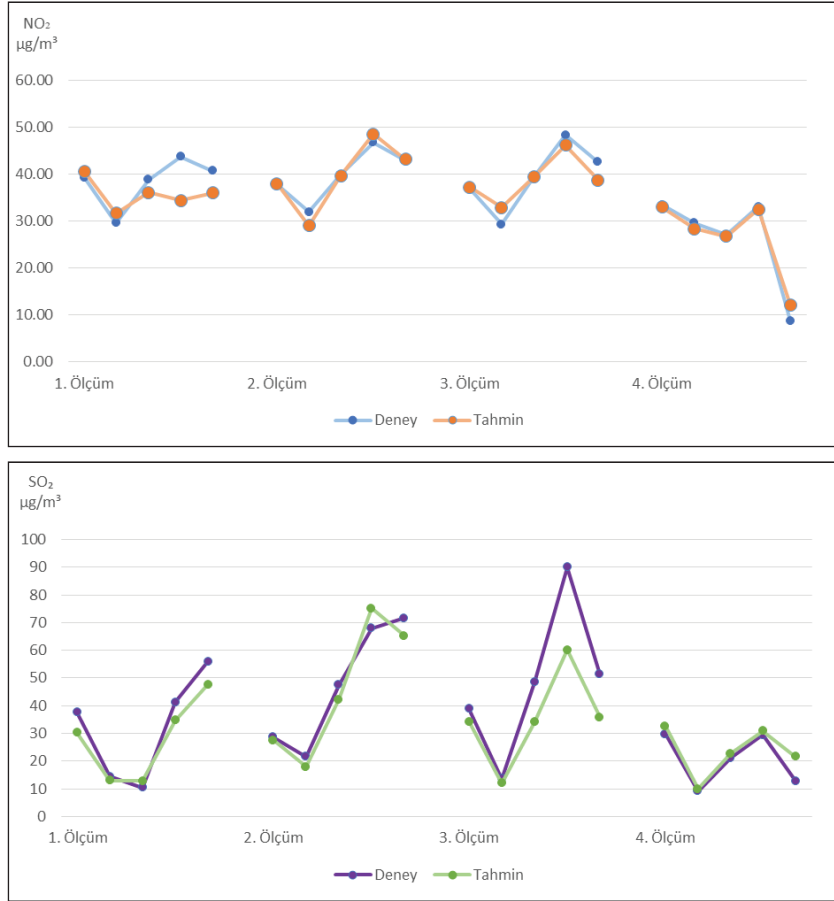
Şekil 5. Lineer Model ile SO₂ Projeksiyonu.Şekil 6. NARX-ANN Bayesian Algoritması Regresyon Sonuçları; A) NO₂ ve B) SO₂.

eşit olduğu yani hedef (Target) çizgisidir. “Data” göstergesi ise elde edilen modelin tahmin değerlerini ifade etmektedir (Erdem 2019).

Şekil 6a ve 6b’de görüleceği üzere NO₂ için R=0.93734 (R²=0.8786) ve MSE=13.1; SO₂ için ise R= 0.94985 (R²=0.9022) ve MSE=21.5 olarak bulunmuştur.

Geliştirilen NARX-ANN modelinde regresyonlar için etkin sonuçlar elde edilirken, MSE için yüksek değerler ortaya çıkmıştır. Bilgi akışının ve işlenmesinin yönüne göre ANN’ler ileri beslemeli sinir ağlarında (FNN) tek yönlü

bir bilgi akışı ile katmanlar halinde düzenlenirken, NARX-ANN gibi tekrarlayan ağlarda, bilgi aynı veya önceki katmanlardaki nöronlar arasında bağlantılara izin vererek hem ileri hem de geri yönde akmaktadır (ASCE 2000, Yetkin ve Kim 2019, Di Nunno ve Granata 2020). Dolayısıyla çalışmada girdi/çıkı parametrelerinin yüksek sayıda olması, çıkı verilerinin girdi verileriyle beraber yeniden kullanılması, verilerin alındığı numune noktaları ile bunların alınma periyotlarındaki sıklığın uyumsuzluğu gibi nedenlerle modelin sağlıklı bir şekilde eğitilmesi neticesinde MSE’lerin yüksek çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Ölçülen yıllık ortalama NO₂ ve SO₂ değerleri ile NARX-ANN tahminlerinin karşılaştırılması.

Çalışmada ayrıca NO₂ ve SO₂ pasif örnekleme ölçüm sonuçlarının yıllık ortalamaları ile NARX-ANN modeli tarafından tahmin edilen değerler 4 ölçüm dönemi (2015-2019) için Şekil 7'de karşılaştırılmıştır. Şekil 7'de ölçülen yıllık ortalama NO₂ ve SO₂ değerleri ile NARX-ANN tahmin değerlerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Covid-19 salgını nedeniyle 2020 verileri çok sağlıklı olmadığı için kullanılmamıştır.

Literatürde, geliştirilen ANN ve NARX-ANN modelleri ile yapılan projeksiyon çalışmalarında güven aralıklarının 0.66 ile 0.99 arasında değiştiği görülmüştür (Kunt 2014, Yorkor vd. 2017, Ayturan vd. 2017, Fırat 2020). Bu değişimin veri toplamada kullanılan yöntem farklılıklarından (aktif ve pasif örnekleme yöntemleri, otomatik online analizörler, uzaktan algılayıcılar ve biyoindikatörler) ve yöntemlerin güvenilirlik oranlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Gaziantep'in 2015-2020 yılları arasındaki hava kalitesini NO₂ ve SO₂ kirlenitçi konsantrasyonları açısından inceleyen bu çalışmada; pasif örnekleme yöntemi ile kirlenitçi konsan-

rasyonları ölçülmüş, sonuçlar istatistiksel açıdan yorumlanmış ve geleceğe yönelik kirlenitçi projeksiyonları oluşturulmuştur.

NO₂ ve SO₂ konsantrasyonlarının ölçüm yapılan yıllarda artış gösterdiği ve özellikle kış mevsiminde HKDYY sınır değerleri aştığı tespit edilmiştir. Kirlenitçi konsantrasyonlarındaki artışın; başta kış mevsiminin soğuk geçmesi, ısınma amaçlı kaçak ve kalitesiz katı yakıt kullanımı, araç sayısındaki artış ve trafik yoğunluğu, bakımsız, sıvasız, yalıtımsız ve bitişik nizam yapıların çokluğu ve şehir içerisinde yeterli hava koridorlarının bulunmaması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Yapılan istatistiksel değerlendirmede NO₂'nin yıllara göre değişiminin anlamlı olmadığı ($p > 0.05$), SO₂ değişiminin anlamlı olduğu ($p < 0.05$) görülmüştür. Ayrıca NO₂ ve SO₂ parametreleri arasında istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.01$) ve pozitif bir ilişkinin olduğu, yani parametrelerin biri artarken diğ erinin de paralel olarak arttığı tespit edilmiştir. NO₂ ve SO₂ projeksiyonu için SigmaPlot 11.0 kullanılarak geliştirilen lineer modelde R² değeri sırasıyla 0.9999 ve 0.9762 olarak elde edilmiştir. 2040 yılı için yapılan projeksiyonda ise kirlenitçi konsantrasyonları yine sırasıyla 50.91

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve $168.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak tahmin edilmiştir. Geliştirilen ANN ve NARX-ANN modelleri içerisinde uygun model NARX-ANN yapısı ve Bayesian Regularization Algoritması olarak tespit edilmiştir. NO_2 için $R=0.93734$ ($R^2=0.8786$) ve $\text{MSE}=13.1$; SO_2 için ise $R= 0.94985$ ($R^2=0.9022$) ve $\text{MSE}=21.5$ olarak hesaplanmıştır.

Bu tespitler doğrultusunda Gaziantep'in hava kalitesinin iyileştirilmesi ve sürdürülebilir olması açısından, geleceğe yönelik kentsel dönüşüm ve şehir planlamalarının yapılması, nüfus yoğunluğunun homojen olarak dağıtılması, trafik yoğunluğunu azaltacak toplu ulaşım gibi altyapıların oluşturulması, alternatif temiz yakıtlara ilişkin teşvik ve hibe çalışmalarının artırılması, bilgi ve iletişim teknolojileri ile sabit/mobil ölçüm sensörleri entegre edilen akıllı şehir konsepti kurulması ve meteorolojik faktörlerin dikkate alınması önem arz etmektedir.

5. Kaynaklar

- Akben, İ., Demirer, Y. 2018.** Lojistik sektöründe çevreci araç uygulamaları. *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 3 (2), 47-56. Hasan Kalyoncu Üniversitesi.
- Akbulut, İ., Özcan, B. 2020.** Hava kirliliği tahmini: yapay sinir ağları ve regresyon yöntemleriyle bir karşılaştırma. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 12-22.
- Akyürek, Ö. 2012.** Trabzon kent merkezi için hava kirliliği ile meteorolojik koşullar arasındaki ilişkinin 2006-2011 arası verilerine dayalı olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, 157 s.
- Amini, A., Başlamışlı, Ç., İnce, BC. 2017.** Elektrikli/hibrit otobüslerin enerji yöntemi algoritmalarının optimal kontrol yöntemleriyle tasarlanması: Ankara şehri için bir örnek durum incelemesi ve maliyet analizi, https://www.researchgate.net/profile/Selahattin_Baslamisli/publication/321170615.
- Arabacı M., Bayram M., Yüceer, M., Karadurmuş, E. 2010.** Tuğla ve kiremit fabrikalarının hava kirliliğine katkılarının yapay sinir ağı modellemesi ile araştırılması. *9. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, s. 727-728, Ankara.
- Arhami, M., Kamali, N., Rajabi, MM. 2013.** Predicting hourly air pollutant levels using artificial neural networks coupled with uncertainty analysis by Monte Carlo simulations. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(7), 4777-4789. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-012-1451-6>.
- ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, 2000.** Artificial neural networks in hydrology. I: preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 115-123. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:2\(115\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(115))
- Asgari, G., Shabanloo, A., Salari, M., & Eslami, F. 2020.** Sonophotocatalytic treatment of AB113 dye and real textile wastewater using ZnO/persulfate: Modeling by response surface methodology and artificial neural network. *Environmental Research*, 184, 109367. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109367>.
- Aydoğdu, Ç. 2021.** Yenilenebilir enerji sektöründe ve enerji verimliliğinde kamusal destekler ve türkiye'de yansımaları. *Akademik İzdüşüm Dergisi*, 6(1), 52-74 ISSN:2547-9725.
- Ayturan, YA., Öztürk, A., Ayturan, ZC. 2017.** Modelling of pm10 pollution in karatay district of konya with artificial neural networks. *J. Int. Environmental Application & Science*, 12(3), 256-263.
- Bararpour, ST., Feylizadeh, MR., Delparish, A., Qanbarzadeh, M., Raeiszadeh, M., Feilizadeh, M. 2018.** Investigation of 2-Nitrophenol solar degradation in the simultaneous presence of $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ and H_2O_2 : using experimental design and artificial neural network. *Journal Of Cleaner Production*, 176, 1154-1162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.191>
- Battista, G. 2017.** Analysis of the air pollution sources in the city of rome (Italy). *Energy Procedia*, 126, 392-397. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.271>
- Benramdane, I. K., Nasrallah, N., Amrane, A., Kebir, M., Trari, M., Fourcade, F., ... & Maachi, R. 2021.** Optimization of the artificial neuronal network for the degradation and mineralization of amoxicillin photoinduced by the complex ferrioxalate with a gradual and progressive approach of the ligand. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 406, 112982. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112982>
- Bishop, CM. 1995.** Neural networks for pattern recognition. *Oxford University Press*. ISBN: 0 19 853864 2
- Borrego, C., Monteiro, A., Ferreira, J., Miranda, AI., Costa, AM., Carvalho, AC., Lopes, M. 2008.** Procedures for estimation of modelling uncertainty in air quality assessment. *Environment International*, 34, 613-620. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.005>.
- Boussaada, Z., Curea, O., Remaci, A., Camblong, H., & Mrabet Bellaaj, N. 2018.** A nonlinear autoregressive exogenous (NARX) neural network model for the prediction of the daily direct solar radiation. *Energies*, 11(3), 620. <https://doi.org/10.3390/en11030620>.
- Bozkurt, Z., Üzmez, ÖÖ., Döğeroğlu, T., Artun, G., & Gaga, EO. 2018.** Atmospheric concentrations of SO_2 , NO_2 , ozone and VOCs in Düzce, Turkey using passive air samplers: sources, spatial and seasonal variations and health risk estimation. *Atmospheric Pollution Research*, 9(6), 1146-1156. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.05.001>

- Bülbül, ES. 2000.** Çoklu karşılaştırma testleri ve bir örnek uygulama. *Öneri Dergisi*, 3(14), 95-100.
- Cabaneros, SM., Hughes, B. 2022.** Methods used for handling and quantifying model uncertainty of artificial neural network models for air pollution forecasting. *Environmental Modelling and Software*, 158, 105529. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105529>.
- Cadenas, E., Rivera, W., Campos-Amezcuca, R., Heard, C. 2016.** Wind speed prediction using a univariate ARIMA model and a multivariate NARX model. *Energies*, 9(2), 109. <https://doi.org/10.3390/en9020109>.
- Cansaran, D. 2017.** Bir çevre sorunsalı olarak hava kirliliği: Kırıkkale ili örneği. *Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(7), 16. <https://doi.org/10.29029/busbed.336094>
- Cox, RM. 2003.** The use of passive sampling to monitor forest exposure to O₃, NO₂ and SO₂: a review and some case studies. *Environ Pollution*, 126: 301-311. DOI:10.1016/s0269-7491(03)00243-4.
- Di Nunno, F., Granata, F. 2020.** Groundwater level prediction in apulia region (Southern Italy) using NARX neural network. *Environmental Research*, 190, 110062. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110062>
- Doğan, F., Kitapçıoğlu, G. 2007.** İzmir ilinde hava kirliliğinin yıllar itibarıyla karşılaştırılması. *Ege Tıp Dergisi*, 46, 129-133.
- Dokuz, Y., Bozdağ, A., Gökçek, ÖB. 2020.** Hava kalitesi parametrelerinin tahmini ve mekansal dağılımı için makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılması. *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.*, 9(1), 37-47, ISSN: 2564-6605.
- Elmolla, ES., Chaudhuri, M., Eltoukhy, MM., 2010.** The use of artificial neural network (ANN) for modeling of COD removal from antibiotic aqueous solution by the Fenton process. *Journal Of Hazardous Materials* 179(1-3), 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.068>
- Erdem, F. 2019.** S. Cerevisiae ile Remazol Sarı (Rr) giderimine yapay sinir ağı (YSA) yaklaşımı. *Uludağ University Journal Of The Faculty Of Engineering*, 24(2), 289-298. <https://doi.org/10.17482/uumfd.461122>.
- Fırat, Y., 2020.** NARX modellerini kullanarak hava kalitesi tahmin analizinin uygulanması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 442-455. DOI: 10.17714/gumusfenbil.605649
- Freeman BS., Taylor G., Gharabaghi B., Thé J. 2018.** Forecasting air quality time series using deep learning. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68, 866-886, <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1459956>.
- GAZDAŞ, 2022.** 2021 entegre faaliyet raporu. *Zorlu Enerji*, 344 Sayfa. <https://www.zorluenerji.com.tr/uploads/pdf/pdfflist/yillik-faaliyet-raporu-20.pdf> (Erişim tarihi 01.05.2022).
- Gaziantep Çevre Durum Raporu, 2020.** Gaziantep Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 141 sayfa. https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/gaz-antep_2019_-cdr_son-20210108090747.pdf. (Erişim tarihi: 15.12.2022)
- Gholizadeh, AM., Zarei, M., Ebratkahan, M., & Hasanzadeh, A. 2021.** Phenazopyridine degradation by electro-Fenton process with magnetite nanoparticles-activated carbon cathode, artificial neural networks modeling. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104999. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104999>
- Greenpeace, 2019.** <https://www.greenpeace.org>. <https://www.greenpeace.org/static/planet4-turkey-stateless/f3bcd604-greenpeace-afsin-maras-hava-olcum-raporu-2020.pdf>. (Erişim tarihi: 20.12.2022).
- GSO (Gaziantep Sanayi Odası), 2022.** Sanayi bölgeleri. <https://gso.org.tr/tr/genel-sayfa/gaziantep-sanayisi/sanayi-bolgelere-56.html>, 2022. (Erişim tarihi 01.05.2022).
- Gümrükçüoğlu, M., Soylu, S. 2011.** Adapazarı'nda ısınma kaynaklı hava kirliliğinin incelenmesi. *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, Antalya.
- Havlicek, LL., Peterson, NL. 1977.** Effect of the violation of assumptions upon significance levels of the Pearson r. *Psychological Bulletin*, 84(2), 373-377. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.84.2.373>.
- Heidari, E., Daeichian, A., Sobati, MA., Movahedirad, S. 2020.** Prediction of the droplet spreading dynamics on a solid substrate at irregular sampling intervals: nonlinear auto-regressive exogenous artificial neural network approach (NARX-ANN). *Chemical Engineering Research and Design*, 156, 263-272, DOI: 10.1016/j.cherd.2020.01.033.
- Ielpo, P., Mangia C., Marra, GP., Comite, V., Rizza, U., Uricchio, VF., Fermo, P. 2019.** Outdoor spatial distribution and indoor levels of NO₂ and SO₂ in a high environmental risk site of the south Italy. *Science of The Total Environment*, 648, 787-797. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.159>.
- Irmak, ME., Aydılek, İB. 2019.** Hava Kalite İndeksinin Tahmin Başarısının Artırılması için Topluluk Regresyon Algoritmalarının Kullanılması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(3), 507-514. <https://doi.org/10.21541/apjes.478038>.
- Kalantary, RR., Moradi, M., Pirsahab, M., Esrafilı, A., Jafari, AJ., Gholami, M., Vasseghian, Y., Antolini, E., Dragoi, EN. 2019.** Enhanced photocatalytic inactivation of E. coli by natural pyrite in presence of citrate and EDTA as effective chelating agents: experimental evaluation and kinetic and ANN models. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102906. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102906>.
- Kara, G. 2016.** Konya'daki hava kalitesi, AB ve HKDY standartları ile karşılaştırılması, *Selçuk Teknik Dergisi*, 15(2), ISSN 1302-6178.

- Karataş, A., Kılıç, S. 2017.** Sürdürülebilir kentsel gelişme ve yeşil alanlar. *Journal of Political Sciences*, 26(2), 53-78. DOI: 10.26650/siyasal.2017.26.2.0003.
- Kentair, 2013.** Gaziantep hava kalitesi değerlendirme raporu. *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, s. 85. <https://docplayer.biz.tr/8822858-Kentlerde-hava-kalitesinin-gelistirilmesi-projesi-kentair-gaziantep-hava-kalitesi-degerlendirme-raporu.html> (Erişim tarihi 01.05.2022).
- Kocaman, Ö. 2010.** Erzurum'da pasif örnekleme yöntemiyle alansal hava kalitesinin tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, s. 58.
- Kunt, F. 2014.** Bulanık mantık ve yapay sinir ağları yöntemleri kullanılarak Konya il merkezi hava kirliliği modellenmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, s. 151.
- Li, X., Hussain, S.A., Sobri, S., & Said, MSM. 2021.** Overviewing the air quality models on air pollution in Sichuan Basin, China. *Chemosphere*, 271, 129502. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129502>
- Liu, H., Yan, G., Duan, Z., Chen, C. 2021.** Intelligent modeling strategies for forecasting air quality time series: A review. *Applied Soft Computing Journal*, 102, 106957. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106957>.
- Masood A., Ahmad K. 2021.** A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: Fundamentals, application and performance. *Journal of Cleaner Production*, 322, 129072. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129072>.
- Mathworks, 2020.** MATLAB Deep Learning Toolbox Release 2020a. Natick, Massachusetts, United States.
- Ng, KY., Awang. N. 2018.** Multiple linear regression and regression with time series error models in forecasting PM10 concentrations in Peninsular Malaysia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 63. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6419-z>.
- Oda, V., Korkmaz, M., Özkurt, E. 2016.** Büyüme eğrilerinin tahmininde kullanılan bazı sigmoidal modeller ve elde edilen biyolojik parametreler: Bertalanffy modeli örneği. *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.*, 6(1), 54-66.
- Özden, Ö., Yay, OD., Altuğ, H., Gaga, E., Demirel, G., Ögeroğlu, D., Örnektekin, S., Meliefste, K., Doorn, WV. 2008.** Eskişehir'de hava kirliliği ön değerlendirme çalışmalarının pasif örnekleme yöntemiyle gerçekleştirilmesi. *Hava Kirliliği ve Kontrolü Ulusal Sempozyumu*, s. 631-642, Hatay.
- Polat, N. 2016.** Kütahya bölgesinde inorganik kirleticilerin alansal dağılımlarının ve mevsimsel değişimlerinin pasif örnekleme metodu ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Anadolu Üniversitesi, s. 115.
- Radwan, M., Alalm, MG., & Eletriby, H. 2018.** Optimization and modeling of electro-Fenton process for treatment of phenolic wastewater using nickel and sacrificial stainless steel anodes. *Journal of Water Process Engineering* 22, 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.003>.
- Rosario, L., Pietro, M., Francesco, SP. 2016.** Comparative analyses of urban air quality monitoring systems: passive sampling and continuous monitoring stations. *Energy Procedia*, 101, 321 – 328. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.041>
- Sabour, MR., Amiri, A. 2017.** Comparative study of ANN and RSM for simultaneous optimization of multiple targets in Fenton treatment of landfill leachate. *Waste management*, 65, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.048>.
- Sarı, B., Türkes, S., Güney, H., Keskinan, O., 2022.** The Utilization and Modeling of Photo-Fenton Process as a Single Unit in Textile Wastewater Treatment. *Clean – Soil, Air, Water*, 2100328. <https://doi.org/10.1002/clen.202100328>.
- Sarı, MF., Esen, F. 2019.** PM10 ve SO2 konsantrasyonları ve meteorolojik parametrelerin konsantrasyonlar üzerine etkileri. *NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 689-697. Doi: 10.28948/Ngumuh.598226.
- Sümer, ÇG. 2014.** Hava kirliliği kontrolü: Türkiye'de hava kirliliğini önlemeye yönelik yasal düzenlemelerin ve örgütlenmelerin incelenmesi. *Uluslararası İktisadi ve İdari Akademik Araştırmalar Dergisi*, 7(13), 38-56, ISSN 1307-9832
- Şenoğlu, B., Acıtaş, Ş. 2010.** İstatistiksel deney tasarımı: sabit etkili modeller. *Nobel Yayın Dağıtım*, s. 22, İstanbul.
- Talwar, S., Verma, AK., Sangal, VK. 2019.** Modeling and optimization of fixed mode dual effect (photocatalysis and photo-Fenton) assisted Metronidazole degradation using ANN coupled with genetic algorithm. *Journal of Environmental Management* 250, 109428. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109428>
- TS EN 13528- 2022.** Laboratuvarlararası karşılaştırma ile yeterlilik deneyinde kullanılan istatistiksel yöntemleri, <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx>.
- TÜİK, 2019.** İstatistik veri portalı, nüfus ve demografi verileri, <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=nufus-ve-demografi-109&dil=1>, (Erişim Tarihi, 01.05.2022).
- UAB (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı), 2020.** Ulaşım ve iletişimde gaziantep raporu. s. 55. <https://www.uab.gov.tr/uploads/cities/gaziantep/27-gaziantep.pdf>. (Erişim tarihi 01.05.2022).
- Üzmez, Ö., Ercan, Ö., Gaga, E., Döğeroğlu, T. 2017.** İnorganik (NO₂, SO₂ ve O₃) pasif örnekleme sonuçlarının saha koşullarında otomatik analizör verileriyle karşılaştırılması. *VII. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu*, s. 9.

WWF (World Wildlife Fund), 2022. İklim değişikliği ve enerji. https://www.wwf.org.tr/ne_yapiyoruz/iklim_degisikligi_ve_enerji/iklim_degisikligi.

Yetkin, M., Kim, Y. 2019. Time series prediction of mooring line top tension by the NARX and Volterra model. *Applied Ocean Research*, 88, 170-186. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.04.013>.

Yorkor, B., Leton, TG., Ugbebor, JN. 2017. Prediction and modeling of seasonal concentrations of air pollutants in semi-urban region employing artificial neural network ensembles. *International Journal of Environment And Pollution Research*, 5(3), 1-18.

Yüksek, AG., Bircan, H., Zontul, M., Kaynar, O. 2007. Sivas ilinde yapay sinir ağları ile hava kalitesi modelinin oluşturulması üzerine bir uygulama. *C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 8(1), 97- 112.

Zang, Y., Bocquet, M., Mallet, V., Seigneur, C., Baklanov, A. 2012. Real-time air quality forecasting, part I: History, techniques, and current status. *Atmospheric Environment*, 60, 632-655. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.031>

Zhang, T., Barthorpe, RJ., Worden, K. 2020. On treed gaussian processes and piecewise-linear NARX modelling. *Mechanical Systems And Signal Processing*, 144, 106877. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106877>.



Ultra Geniş Bant Teknolojisi ile Kapalı Alanlarda Konum Belirleme

Indoor Positioning System Based on Ultra-Wide-Band Technology

İbrahim Alışkan¹ , Arif Şahin^{2,*} 

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu makalede iç mekânlarda iki boyutlu uzayda (x, y) hassas konum kestirim sistemi tasarlanması ve uygulanması hedeflenmiştir. Kapalı alanlarda ve iç mekânlarda konum belirlemede kullanılan birçok teknoloji mevcuttur. Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID), Ultra Geniş Bant (UWB), Wi-Fi, ZigBee ve Bluetooth söz konusu teknolojiler arasında bulunmaktadır. Ultra Geniş Bant teknolojisi diğer teknolojilerle maliyet, kapsama alanı, konum kestiriminde yüksek doğruluk gibi kriterler baz alınarak kıyaslanmış ve ilerleyen bölümlerde ayrıntılarıyla açıklanan avantajlarından dolayı bu projede kullanılmıştır. Oluşturulan sistem temel olarak bir hedef nesne (Tag), üç adet sabit referans alıcı modül (Anchor) ve elde edilen dataları işleyerek simüle eden bir ana bilgisayardan oluşmaktadır. Projede mesafe ölçümleri için Varış Zaman Farkı (TDoA) metodu seçilmiş ve çalışmada uygulanmıştır. Matematiksel konum belirleme tahmin metodu olarak Çember Kesişimi (Trilateration) uygulanmıştır. Hedef nesnenin anlık konum kestirimi yapılmış ve Gerçek Zamanlı Konum Belirleme Sistemi (RTLS) gerçekleştirilmiştir. Konum kestiriminde tespit edilen hatalar irdelenmiş, hataların azaltılabilmesi için Kalman filtresi uygulanmıştır. Ayrıca sabit referans alıcıların dikey pozisyonda, eşit yükseklikte ve dar açılı üçgen oluşturacak şekilde deney ortamına yerleştirildiklerinde konum kestirimindeki doğruluğun arttığı saptanmıştır. Filtre uygulaması ve sabit referans alıcı modüllerin optimum pozisyonlara yerleştirilmesiyle en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kapalı alan konumlandırma, Ultra geniş bant sensor, TDoA, Trilaterasyon, Kalman filtresi


Abstract

In this article, it is aimed to design and implement a system that can make precise position estimation on two-dimensional space (x, y) for indoor areas. There are many technologies used for solution in determining location indoor areas. Technologies such as Radio Frequency Identification (RFID), Ultra Wide Band (UWB), Wireless Fidelity (Wi-Fi), ZigBee and Bluetooth are among these solutions. Ultra Wide Band technology was compared with other technologies on the basis of criteria such as cost, coverage area, high accuracy in location estimation, and was used in this project due to its advantages explained in detail in the following sections. The created system basically consists of the target object (Tag), three fixed reference receiver modules (Anchor) and a main PC that processes and simulates the obtained data. In the project, the Time Difference of Arrival (TDoA) method was chosen for distance measurements and applied in the study. Trilateration was applied as a mathematical positioning estimation method. The location estimation of the target object was made continuously and Real Time Location System (RTLS) was performed and simulated on the PC. Errors in position estimation were examined and Kalman filter was applied to increase accuracy. In addition, it has been determined that the accuracy in position estimation is increased when the fixed reference receivers are placed in the experimental environment in a vertical position, equal height and forming an acute-angled triangle. The best results were obtained by applying filters and placing the fixed reference receiver modules in optimum positions.

Keywords: Indoor positioning, Ultra-wide band sensors, TDoA, Trilateration, Kalman filter

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: arif.sahin40@gmail.com

İbrahim Alışkan  orcid.org/0000-0003-3901-4955

Arif Şahin  orcid.org/0000-0003-2237-0574



1. Giriş

Gelişen teknoloji ile beraber günümüzde nesne, araç ve kişi konumlarını belirlemek artık mümkündür. Konum belirlemede çeşitli matematiksel hesaplamalar, teknolojiler ve bunlar ışığında geliştirilmiş birçok uygulama yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler arasında en çok bilinen ve kullanılan ise Küresel Konumlama Sistemi (GPS)' dir. GPS sistemi, açık alanlarda çok kullanışlı olmakla birlikte bina, tünel vb. kapalı alanlarda ve yeraltında radyo sinyallerinin zayıflaması, bozulması, iletilmemesi gibi nedenlerden dolayı yeterli seviyede çalışmamaktadır (Sheikh vd. 2021, Yıldırım 2022). Kapalı alanlarda ve iç mekânlarda konum belirlenmesi için bazı lokal çözümler aranmaktadır. Bu çözümler arasında Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID), Ultra Geniş Bant (UWB), Wi-Fi, ZigBee ve Bluetooth gibi teknolojiler bulunmaktadır. RFID tabanlı uygulamalar düşük maliyet ve kolay matematiksel algoritmalar ile ölçüm sonuçları elde edilebildiğinden çok tercih edilmektedir. Ancak RFID tabanlı uygulamalarda 3 ila 5 metrelik hassasiyetlerde konum belirlemek mümkün olabilmektedir. Daha yüksek hassasiyet için okuyucu sayısını artırmak gerekmektedir bu da oluşturulacak sistemin maliyeti artırmaktadır.

UWB sensörlerinin güç tüketimleri diğer teknolojiler ile kıyaslandığında daha düşüktür (Kopta vd. 2017). Ayrıca maliyet, kapsama alanı, doğruluk ölçüleri vb. kriterler esas alınarak diğer teknolojiler ile kıyaslandığında yüksek hassasiyette konum kestirimine olanak sağlayan UWB teknolojisinin iç mekân konumlandırma için uygun yöntem olduğuna karar verilmiştir.

Literatürde, UWB haberleşme teknolojisini farklı biçimlerde kullanan fazla sayıda konum belirleme tahmin yöntemi mevcuttur (Liu vd. 2007). Bu teknikler arasında en çok tercih edilenler; Parmak İzi Yöntemi (Fingerprinting), Yakınlık Yöntemi (Proximity), Üçgenleştirme Yöntemi (Triangulation), Çember Kesişimi Yöntemi (Trilateration) ve Hiperbol Kesişimi Yöntemi (Multilateration) incelenmiştir. Söz konusu konum tahmin yöntemleri arasında Çember Kesişimi (Trilateration) metodu seçilmiş ve bu çalışmada uygulanmıştır.

Konum tahmin yöntemleri kartezyen koordinat sistemi üzerinde aranan nesnenin konumunu matematiksel olarak hesaplamaya ve tahmini konumu belirlemeye olanak sağlar. Matematiksel hesaplamalar için aranan nesne ile referans alıcılar arasındaki mesafeler ve referans alıcıların konumları bilinmelidir.

Radyo sinyalleri ile mesafe ve açı ölçümlerinin farklı teknik ve metodları mevcuttur. Mesafe ölçme tabanlı algoritmalarda iki sinyal düğümü arasında iletilen sinyalin gücü ya da düğümler arası iletişim zamanı veya düğümler arasındaki açı gibi fiziksel büyüklükler kullanılmaktadır. Varış Zamanı (ToA - Time of Arrival), Varış Zamanı Farkı (TDoA - Time Difference of Arrival), Geliş Açısı Yöntemi (AoA- Angle of Arrival), Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (RSSI - Received Signal Strength Indication) ve Parmak izi (Finger Printing) algoritmaları uzaklık ölçme tabanlıdır (Deak vd. 2012, Cui vd. 2018). Wifi, Bluetooth, RFID gibi çoğu yaklaşım sinyal gücünü baz alan RSSI ölçüm tekniklerini kullanırken, Ultra Geniş Bant teknolojisinde zamanı baz alan mesafe ölçüm metodları ile başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu proje için zamanı baz alan TDoA metodu seçilmiş ve çalışmada uygulanmıştır. Oluşturulan sistemin döngüler halinde sürekli devam etmesiyle Gerçek Zamanlı Konum Belirleme Sistemi (RTLS- Real Time Location System) gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca modüller tarafından gerçekleştirilen mesafe ölçüm değerlerinin doğruluğunun artırılması ve konum tahminlerin iyileştirilmesi için sisteme filtrasyon entegre edilmiştir. Bu kapsamda literatürde yer alan Wiener Filtresi, Alçak Geçiren Filtre (Low-Pass Filter), Kalman Filtresi, Gaussian Filtresi, Butterworth Filtresi, Alpha-Beta Filtresi ve Yüksek Geçiren Filtre (High-Pass Filter) filtre uygulamaları incelenmiştir. Burada Kalman filtresi uygulanmıştır. Filtreleme işlemleri sayesinde mesafe ölçümünde kullanılan sinyallerdeki parazitler minimize edilerek konumlardaki keskinlik artırılması hedeflenmiştir.

Bu çalışma ile kapalı alan konum belirleme sistemlerine farklı filtre kombinasyonları dahil edilerek konum kestirimindeki doğruluğun artırılması yönündeki ileri çalışmaların önü açılmıştır. Ayrıca sabit referans alıcıların deney ortamındaki yerleşmelerinin optimum pozisyona ulaşılması ile ilgili edinilen tecrübeler ve sunulan öneriler diğer araştırmacılara ışık tutacaktır.

Çalışmanın devamında Bölüm 2'de metodlar ve donanım altyapısı sunulmuştur. Bölüm 3'te ise uygulama sonuçları analiz edilmiştir.

2. Gereç ve Yöntemler

Bu bölümde sırası ile kullanılan algoritmalar, donanım sistemi ve uygulama sonuçları sunulmuştur.

2.1 Ultra Geniş Bant Teknolojisi (UWB - Ultra Wide Band)

UWB kısa mesafelerde iletişim kurmak için yüksek bant genişliğine sahip bir iletişim teknolojisidir (Engström ve Helander 2015). Kapalı alanlarda konum belirlenebilmesi için yaygınlaşmış tek bir yöntem söylemek zordur. Genellikle Wi-Fi, Kızılötesi, RFID, UWB, Li-Fi, ZigBee, WLAN ve Bluetooth gibi teknolojiler GPS ile kıyaslandığında kapalı alanlarda konumlandırmada daha başarılıdır (Lee vd. 2018). Bir kablosuz iletişim teknolojisi olan UWB, mevcut dar bant veya yayılmış spektrumlu kablosuz iletişim mimarisinden tamamen farklıdır. Diğer birçok yöntemden farklı olarak Ultra Geniş Bant (UWB), ultra kısa darbelerin (saniyede 1-2 Giga darbesi) kullanılması sonucu yüksek hacimli veri hızına (1 Gbps'ye kadar) sahip bir radyo tekniğidir (Zhao 2007). Şekil 1'de gösterildiği üzere UWB radyo frekans spektrumunda geniş bir çalışma aralığına sahiptir (3.1GHz ila 10.6 GHz) (Kopta vd. 2017).

UWB teknolojisi çok kısa darbelerin iletilmesine dayanır ve radyo enerjisinin (geniş bir frekans bandı üzerinde) çok düşük bir güç spektral yoğunluğu ile yayılmasına olanak sağlayan teknikler kullanır (Cheng 2012). UWB sensörlerinin güç tüketimleri, diğer konum belirleme teknolojileri ile karşılaştırıldığında daha düşüktür (Kopta vd. 2017).

İç mekân konumlandırma sistemleri (IPS-Indoor positioning systems) çeşitli çok yollu senaryolarla başa çıkmak zorundadır. UWB çok yollu çözünürlük sunma noktasında oldukça başarılıdır (De Santis vd. 2010). UWB darbelerinin düşük frekansı, sinyalin duvarlar ve nesnelere gibi engellerden etkili bir şekilde geçmesini sağlayarak doğruluğu artırır.

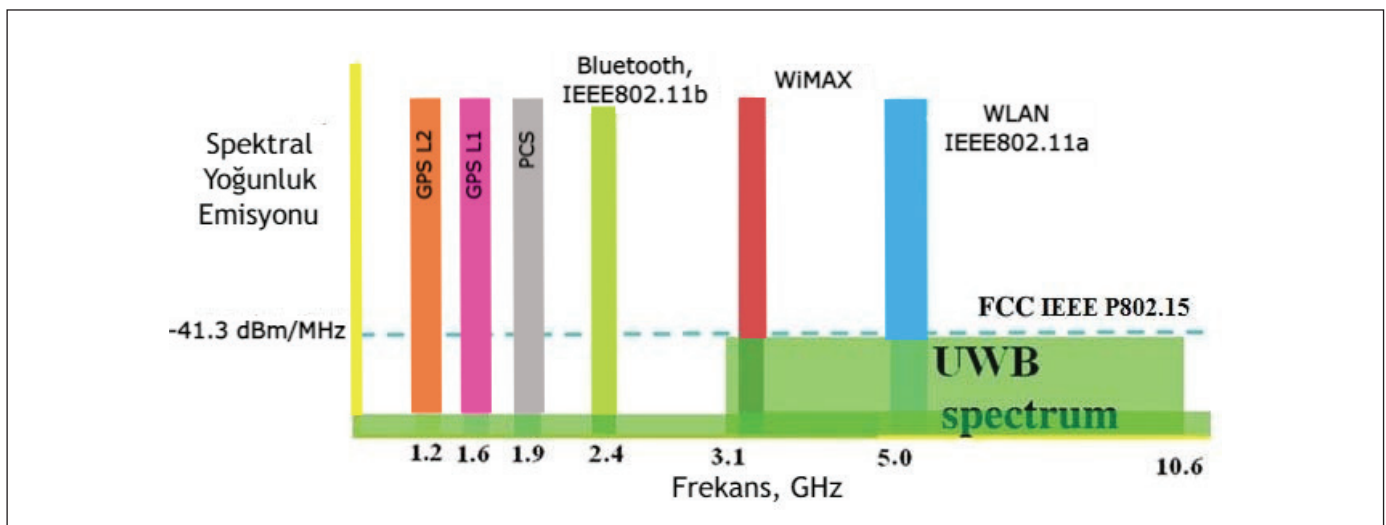
Bu sayede UWB, konumlandırma ve ölçüm mesafelerindeki hatayı santimetre (cm) seviyesine indirebilen yüksek bir doğruluk oranı sağlar (Alarifi vd. 2016). Bu nedenle UWB teknolojisi, yüksek doğrulukta sonuçlar gerektiren kritik konumlandırma uygulamaları için en uygun seçeneklerden biri olarak kabul edilir.

2.2. Konumlandırma Matematiksel Tekniği - Çember Kesişimi (Trilateration)

Literatürde, UWB haberleşme teknolojisini farklı biçimlerde kullanan fazla sayıda matematiksel konum belirleme tahmin yöntemi mevcuttur (Liu vd. 2007). Bu teknikler arasında en çok tercih edilenler; Parmak İzi Yöntemi (Fingerprinting), Yakınlık Yöntemi (Proximity), Üçgenleştirme Yöntemi (Triangulation), Çember Kesişimi Yöntemi (Trilateration) ve Hiperbol Kesişimi Yöntemi (Multilateration)'dir. Çember Kesişimi tekniği konumu bilinen üç referans sinyal alıcı Anchor ile konumu bilinmeyen bir hedef Tag arasında çemberler oluşturup, bu çemberlerin geometrik özelliklerini uygulayarak hedef Tag'ın konumunun tahmini hesaplaması için kullanmasıdır (Artunç 2017). Bu çalışmada Çember Kesişimi tekniği kullanılmış olup konumlandırma iki boyutlu uzayla sınırlıdır.

Koordinat sistemi üzerinde konum hesabı için Çember Kesişimi yönteminin kullanımı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Koordinat sisteminde referans alıcıların (A_1, A_2, A_3) bilinen koordinatları sırası ile $(0, 0)$, $(d, 0)$, (i, j) , hedef nesnenin bilinmeyen koordinatları (x, y) ve referans alıcıların ölçülebilir yarıçapları r_1, r_2, r_3 olmak üzere;



Şekil 1. İç mekân yayılımı için UWB frekans aralığı (Fayadh vd. 2014).

$$x^2 + y^2 = r_1^2 \quad (1)$$

$$(x - d)^2 + y^2 = r_2^2 \quad (2)$$

$$(x - i)^2 + (y - j)^2 = r_3^2 \quad (3)$$

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad (4)$$

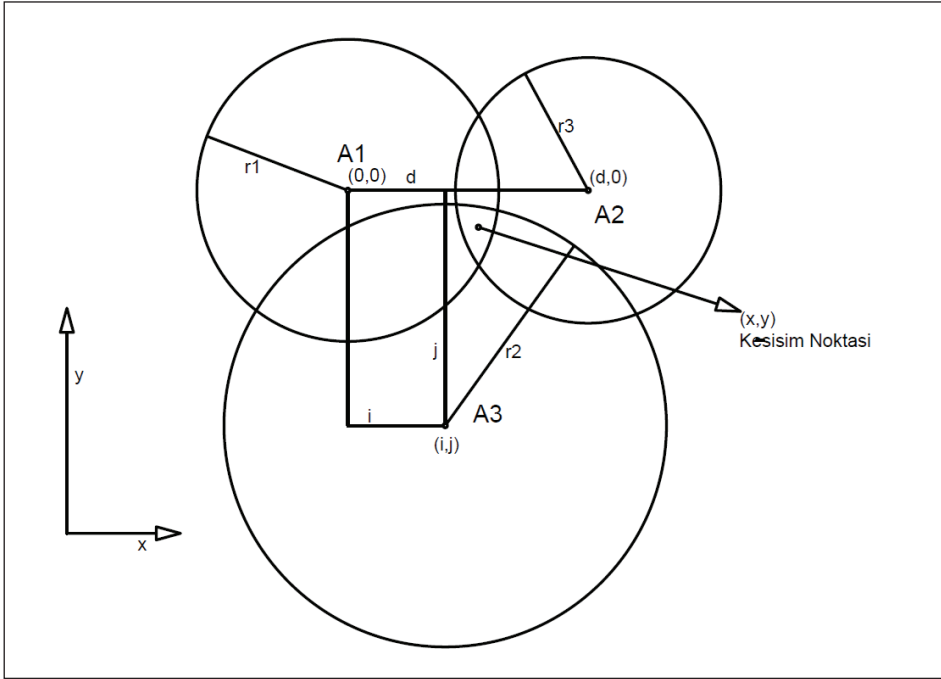
Şekil 2’de gösterildiği gibi, A1 ve A3 numaralı referans alıcıların oluşturduğu çemberlerin birden fazla kesişim noktası olduğu varsayılırsa; $d - r_1 < r_2 < d + r_2$ eşitliklerden (3) ve (4) kullanıldığında;

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 - (x - i)^2 + j^2}{2j} \quad (5)$$

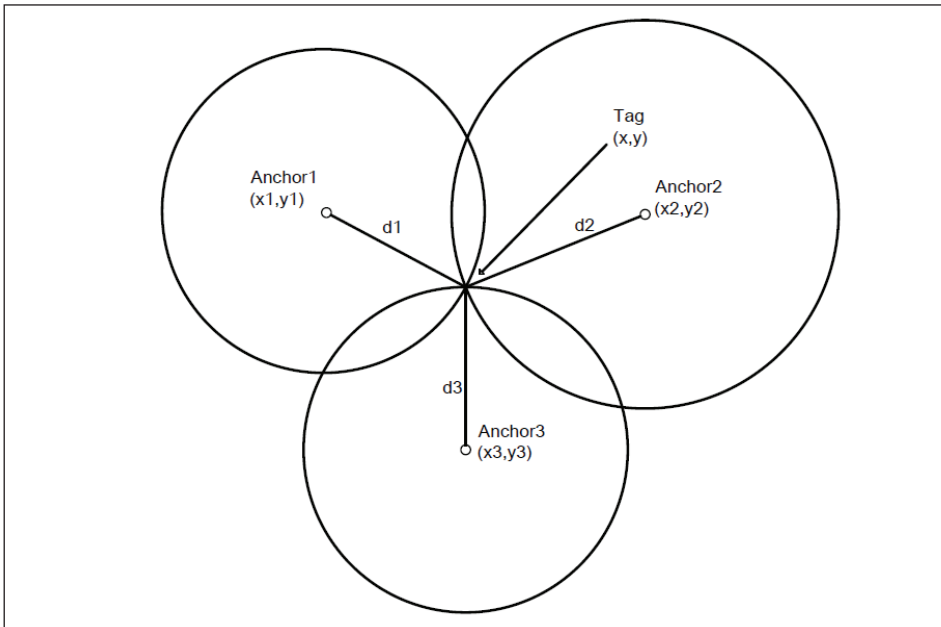
Elde edilmektedir.

İki boyutlu serbest uzayda (x, y) çember kesişimi yöntemi kullanılarak konum kestirimi gerçekleştirilmesi örneği Şekil 3’te sunulmuştur.

Şekil 3’e göre serbest uzayda konumları bilinen referans alıcıların (Anchor1, Anchor2, Anchor3) bilinen koordinatları



Şekil 2. Koordinat sisteminde çember kesişimi yöntemi.



Şekil 3. İki boyutlu serbest uzayda çember kesişimi tekniği.

sırası ile $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$, hedef nesnenin bilinmeyen koordinatları (x, y) ve referans alıcıların ölçülebilen mesafeleri d_1, d_2, d_3 olmak üzere;

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \quad (6)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \quad (7)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \quad (8)$$

Bu ikinci dereceden denklem sistemini basitleştirmek için, eşitlik (8) iki doğrusal denklem oluşturacak şekilde diğer iki denklemde ikame edildiğinde;

$$2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \quad (9)$$

$$2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (10)$$

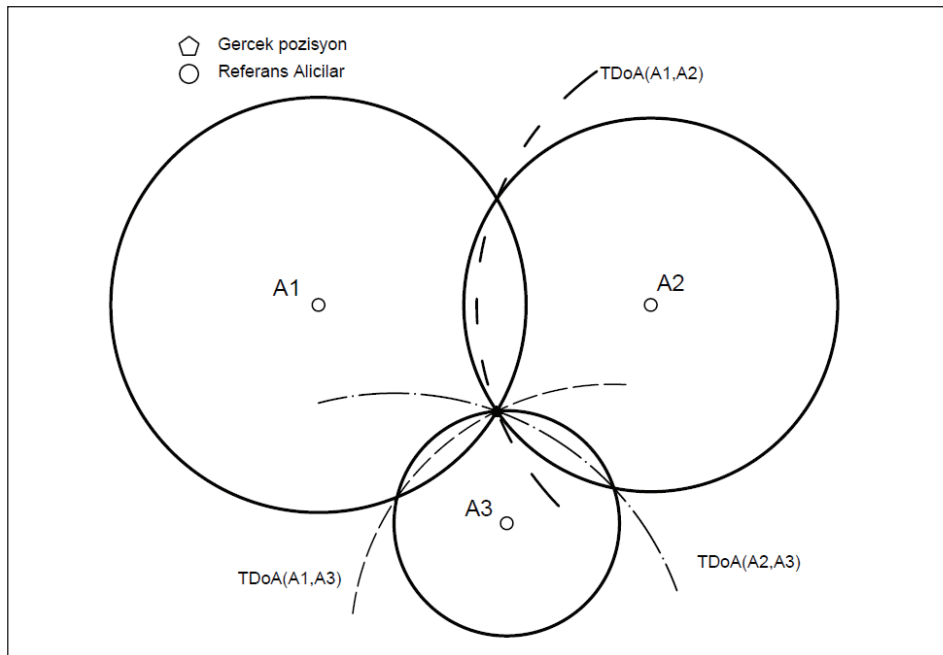
X ve Y koordinatları, Cramer kuralını kullanarak denklem (9) ve denklem (10)'u çözümlenir;

$$x = \frac{\begin{vmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) & 2(y_2 - y_1)y \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) & 2(y_3 - y_1)y \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad (11)$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ 2(x_2 - x_1) & (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad (12)$$

2.3. Mesafe ve Açık Ölçüm Metodu – TDoA (Varış Zamanı Farkı)

Konumlandırmanın matematiksel hesaplamalarının yapılabilmesi için sinyal düğüm noktaları arasındaki açı, mesafe gibi fiziksel ölçülerin bilinmesi gereklidir. Ancak gerçek bir iç mekân ortamı solma, soğrulma, yansıma, etkileşim ve girişim gibi RF dalgalarının gücünü, yönünü ve dağılımını etkileyen unsurlar barındırır. Bu nedenle RF sinyalinin yayılım varyasyonunu kolayca modellemek zordur. Modellemenin yapılabilmesi için mesafe ölçüm algoritması gereksinimi duyulmaktadır. İki sensör düğümü arasındaki fiziksel mesafeyi hesaplamak için kullanılacak birçok ölçüm metodu vardır (Contractor 2008). Bunlar arasında Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (RSSI), Varış Açısı (AoA), Varış Zamanı (ToA), Varış Zamanı Farkı (TDoA) gibi ölçüm yöntemleri bulunmaktadır (Dardari vd. 2009). TDoA metodunda, alıcı çiftlerin sinyalleri alış zamanları farkı kullanılmaktadır (Xiong 2010). TDoA metodu uygulamalarında oluşturulan bütün sistem bileşenlerinin zamanlarının tam olarak senkronize olmasına gerek duymadan sadece sinyal alıcı ve verici çiftleri kendi aralarında senkronize olması yeterlidir. Şekil 4'te gösterildiği gibi, sinyal varış zaman farkları iletilen referans alıcı nokta için hiperbollerle temsil edilir ve bu hiperbollerin kesişimi bilinmeyen noktanın konumunu işaretler. TDoA, çeşitli iç ve dış mekân uygulamaları için kullanılmaktadır (Sheikh vd. 2021). Benzer şekilde üstünlükleri nedeni ile bu çalışmada da TDoA metodu tercih edilmiştir.



Şekil 4. TDoA-Varış zamanı farkı ölçüm prensibi.

Mesafeyi hesaplamak için, TDoA sadece sinyallerin yayıldığı iki baz istasyonu arasındaki sinyal varış zamanı farkını kullanır.

Nesnenin pozisyonu; x, y

Referans alıcılar; A1, A2 ve A3

Referans alıcı mesafeleri; ℓ_1, ℓ_2 ve ℓ_3 ,

$TDoA(A1-A2)$ ve $TDoA(A1-A3)$ sabit olan iki hiperbolik eğridir.

Referans alıcı numarası; n

Sinyal iletim süresi; t

TDoA'yı temsil eden bir simge; k

$C = 3 \times 10^5$ km/sn

Olmak üzere;

$$TDoA A1 - n = |t1 - tn| = k1n \quad (13)$$

$$|\ell_1 - \ell_n| = C \cdot k1n \quad (14)$$

Eşitlikleri kullanılarak Anchor ile Tag arasındaki mesafe hesaplanır.

Örneğin, Christian Núñez Álvarez ve Cristian Crespo Cintas (2010)'a göre Bayesian Çıkarımına dayanan maksimum *posteriori* yaklaşımıyla aşağıdaki gibi bir yöntem sunmuştur.

$$P(x, y | TDoA_{ij}) = \frac{P(TDoA_{ij} | x, y) * P(x, y)}{P(TDoA_{ij})} \quad (15)$$

(15) numaralı denklem iki referans alıcı arasındaki TDoA hesaplaması sonucunda, hedef nesnenin (x, y) koordinatlarında bulunma olasılığını gösterir. Yukarıdaki eşitlikte TDoA_{ij} iki baz istasyon i ve j arasındaki TDoA, $P(x, y)$ önceki pozisyon dağılımı ve $P(TDoA_{ij})$ veri olasılığıdır (Álvarez ve Cintas 2010).

2.4. Kalman Filtresi (Kalman Filter (KF))

Kalman Filtresi, durum uzayı modeli ile gösterilen dinamik sistemde, modelin önceki bilgileriyle birlikte giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin durumlarını tahmin edilebilen bir filtredir. Kalman Filtresi (KF), en ünlü Bayesian filtre teorilerinden biri olarak kabul edilir (Woods ve Radewan 1977). Yaygın kullanılan veri işleme algoritmalarından birisi olan Kalman Filtresi, karmaşık olmayan hesaplama özelliği, tekrar tekrar uygulanabilir yapısı ve Gauss hata dağılımlı lineer sistemlere uyumlu olması nedeniyle, iç mekân konumlandırma sistemlerinde ortamdaki gürültüyü filtrelemek için çok başarılı bir algoritmadır.

Kalman filtresini en basit şekilde yazacak olursak:

$$\widehat{X}_k = K_k \cdot Z_k + (1 - K_k) \cdot \widehat{X}_{k-1} \quad (14)$$

Eşitlikteki parametreler

\widehat{X}_k = Hesaplanan kalman değeri

K_k = Kalman Kazancı

Z_k = Ölçüm sonucu elde edilen değer

\widehat{X}_{k-1} = Bir önceki hesaplanan Kalman değeri

Olarak sunulur.

Kalman filtresinin uygulamasında iki aşama mevcuttur. Bunlar tahmin ve düzeltmedir. Bu iki aşama aynı zaman diliminde yani “ k ” değerinde hesaplanır (Her k değeri için). Filtrenin kullanımı Şekil 5 ile özetlenmiştir.

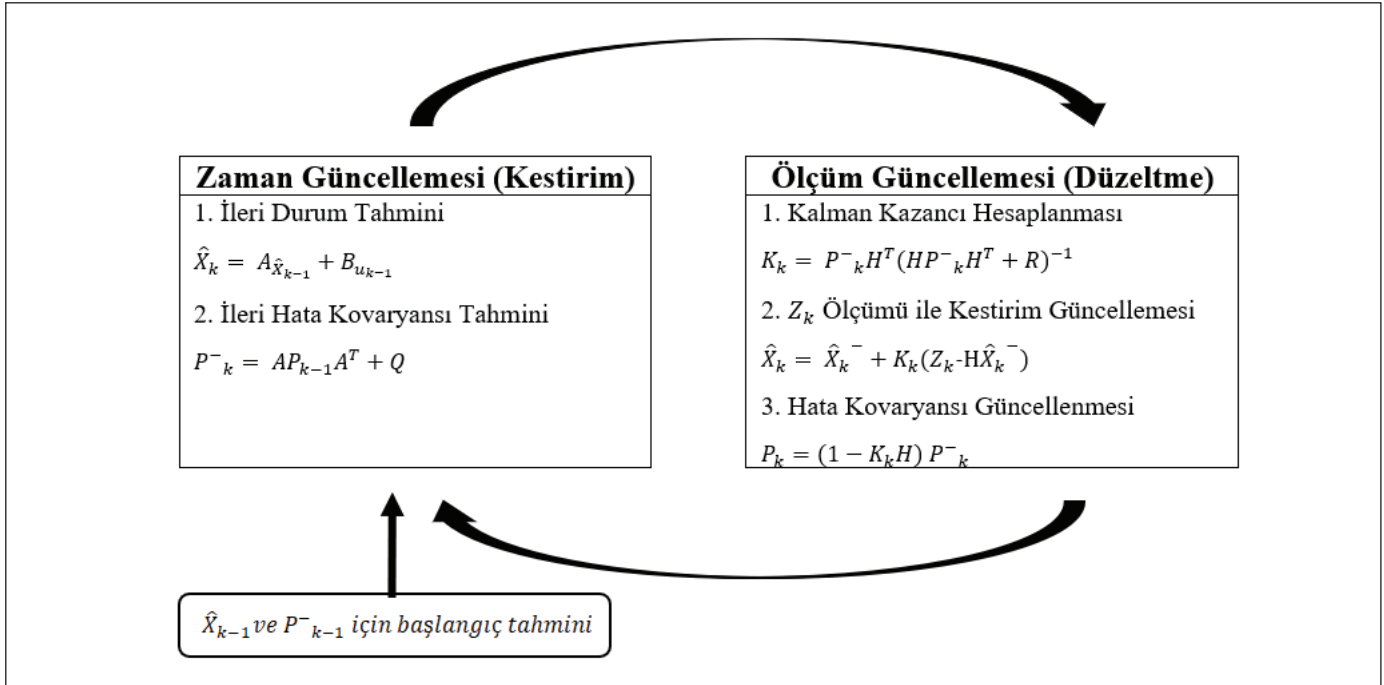
Her bir k değeri için hesaplanan çıktı, $k+1$ sonraki adım için girdi olacaktır. Ölçüm güncelleme aşamasındaki denklemlerde gerçek değeri bulunur. Bu değer x' in k anındaki değeridir (Çayıroğlu 2012 ve Bai 2016).

2.5. Sistem Genel Mimarisi

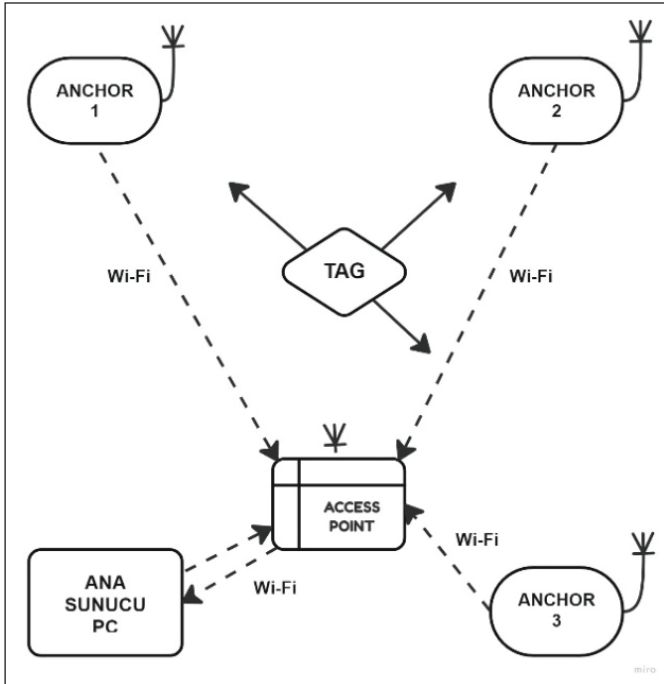
Oluşturulan sistem temel olarak aranan nesne, üç adet sabit referans alıcı ve elde edilen dataları işleyerek simüle eden bir bilgisayardan (PC) oluşmaktadır. Üzerinde UWB uyumlu kablosuz sinyal alıcı-verici modül (DecaWave's DWM1000) ve modüllerin ana PC ile haberleşmesini sağlayacak Wi-Fi (ESP8266-7) modülü bulunan üç adet referans alıcı kapalı alan içerisine sabitlenmiştir. Konumu belirlenecek hareketli nesne üzerine yine UWB modülü yerleştirilmiştir. Referans sinyal alıcılar ile aranan nesne arasında radyo sinyalleri ile haberleşme sağlanmıştır. Ayrıca TDoA metodu ile her bir referans sinyal alıcı ile aranan nesne arasındaki mesafelerin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucu elde edilen mesafe verileri Çember Kesişimi konum belirleme tahmin tekniği ile işlenerek konum kestirimi yapılmıştır. Bu işlemlerin milisaniye mertebesinde döngüler halinde sürekli devam etmesiyle gerçek zamanlı konum belirleme sistemi gerçekleştirilmiştir. PC'ye aktarılan sinyal verileri Python programlama dili kullanılarak oluşturulmuş platformda işlenerek görselleştirilmiştir. Matematiksel hesaplamalar için Python üzerine MATLAB dosya ve kütüphaneleri hazırlanarak entegre edilmiştir. Oluşturulan sistem Şekil 6 ile görselleştirilmiştir.

2.6. Haberleşme ve Veri Akışı

UWB sensörü ve Wi-Fi modülü olan ESP8266-7' nin fiziksel bağlantıları yapıldıktan sonra PCB kart bağlantı



Şekil 5. Kalman filtresinde denklemlerin kullanımı.



Şekil 6. Sistem mimarisi.

pinleri vasıtalıyla FTDI Programlama Kartı kullanılarak USB-TTL UART dönüşümü sağlanarak seri bağlantı oluşturulmuş ve ESP modülü programlanmıştır. Sonrasında seri programlayıcı olan ST-LINK/V2 kullanılarak Arduino IDE yazılım platformu üzerinde hazırlanmış olan program

STM32F103C mikro çipine yüklenmiştir. Sistemde sabit referans sinyal alıcıların ana PC ile haberleşebilmesi için bir erişim noktası (AP) ile lokal ağ kurulmuş ve ana sunucu ile referans sinyal alıcılara statik IP ataması yapılmıştır. Ana sunucu PC ile diğer sistem bileşenleri arasında veri paketi gönderimi UDP protokolü ile sağlanmıştır. Sisteme ilişkin özet veri akışı Şekil 7'de sunulmuştur

2.7. Donanım Bileşenleri

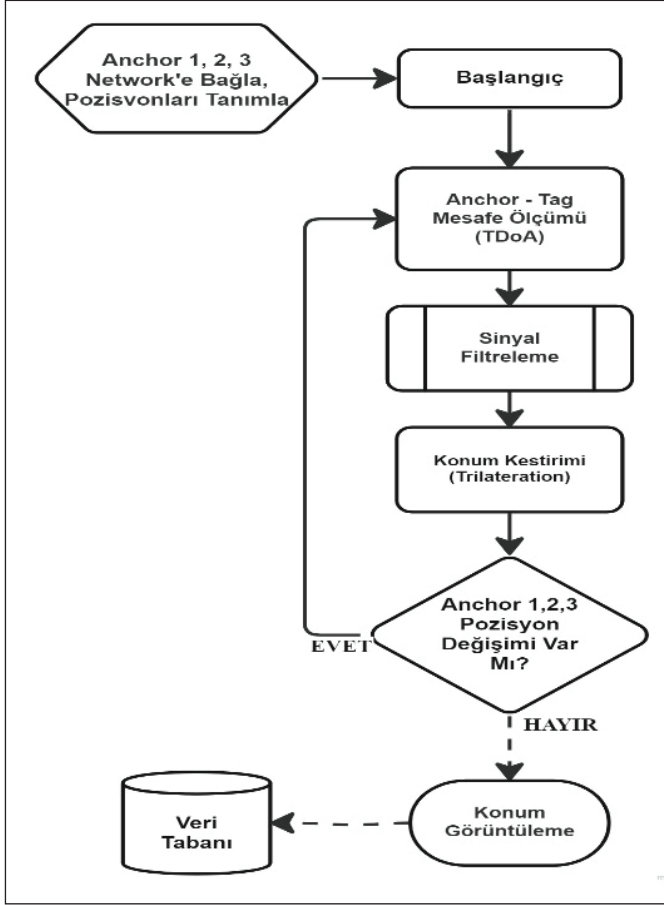
Üzerinde UWB uyumlu kablosuz sinyal alıcı-verici modül (DecaWave's DWM1000) ve modüllerin ana PC ile haberleşmesini sağlayacak Wi-Fi (ESP8266-7) modülü bulunan üç adet referans sinyal alıcı oluşturulmuştur. PCB kart üzerinde STM32F103C mikro çipi bulunmakta olup UWB sensörü ve ESP modülünü entegre çalışabilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 8 sabit referans alıcı alt sisteminde kullanılan elemanlara ait basit görselleri sunmaktadır.

2.8. Deneysel Ortamı

Şekil 9 ile hareketli ve sabit nesnenin 2 boyutlu (x, y) uzayda konum kestirimindeki hataların analizi için oluşturulan 3 m x 3 m ölçülerindeki test ortamı sunulmuştur. Test alanı 0.5 m x 0.5 m'lik gridlere ayrılmıştır. Test ortamını tamamen kapsayacak şekilde üç adet referans alıcı; Anchor1(x₁, y₁), Anchor2(x₂, y₂), Anchor3(x₃, y₃) sırasıyla (0,0), (0,3) ve (3,0) metrik düzenle yerleştirilmiştir.

2.9. İç Mekân Konum Kestirim Sonuçları

Her bir sabit referans alıcı ile hedef nesne arasındaki mesafeler TDoA algoritmasıyla çok sayıda ölçüm yapılarak konum kestiriminin hata seviyeleri incelenmiştir. Sisteme Kalman filtresi uygulanmış olup filtreli ve filtresiz mesafe



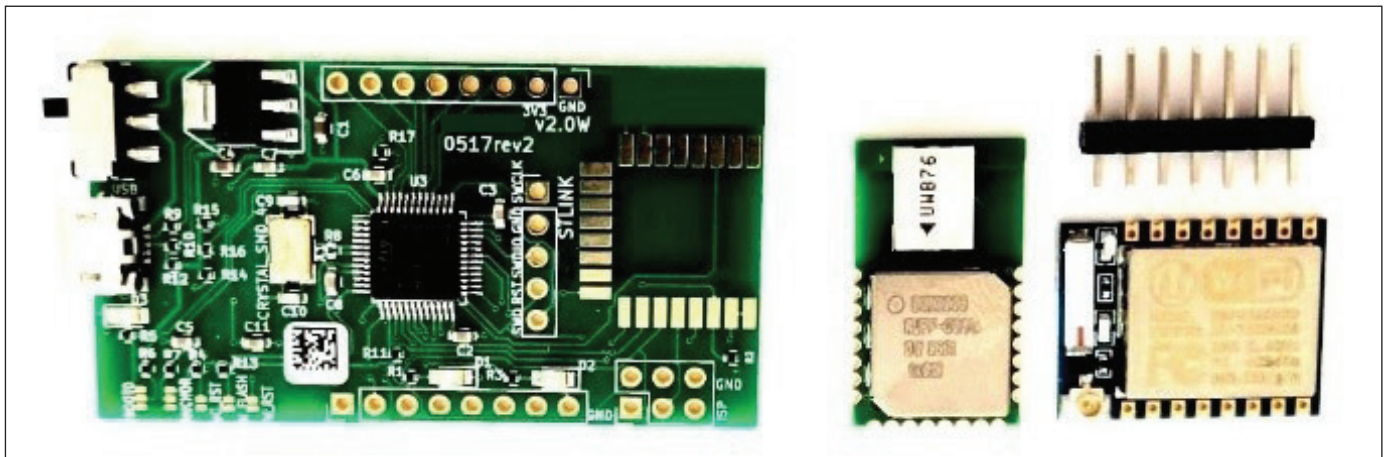
Şekil 7. Sistem algoritmasının akış şeması

ölçümleri kıyaslanmıştır. Hedef nesnenin sabit pozisyonlarında yapılan filtresiz ölçümlerde ortalama 24.69 cm'lik pozisyon hatası tespit edilmiştir. Kalman filtresi uygulanan verilerle elde edilen pozisyonlarda hata ortalamasının 15.45 cm olduğu saptanmıştır. Filtreleme yöntemi ile hata mesafesi 9.24 cm azaltılarak %37.42'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Filtrasyon uygulanması sistem performansında yavaşlama veya gecikmeye sebep olmamıştır. Sabit referans alıcıların deney ortamında optimum pozisyonda (eşit yükseklikte, dikey duruş ve dar açılı üçgen oluşturacak şekilde) olması durumunda ortalama 24.69 cm'lik pozisyon hatasının 22.33 cm ye düştüğü gözlemlenmiş olup, ortalama konum kestirim hatasında %9.55'lik bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Sistemde en az pozisyon hatası ölçümü referans alıcıların optimum pozisyonu ve Kalman filtresi uygulanması sonucunda sağlanmış olup ortalama hata mesafesinin 24.69 cm'den 12.82 cm'ye düştüğü ve ortalama konum kestirim hatasında %48.07'lik bir iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. Şekil 10 ve Şekil 11 ile yukarıdaki açıklamaların/analizlerin temeli oluşturulan pozisyon hata değişimi ve konum kestirim kıyas grafikleri sunulmuştur.

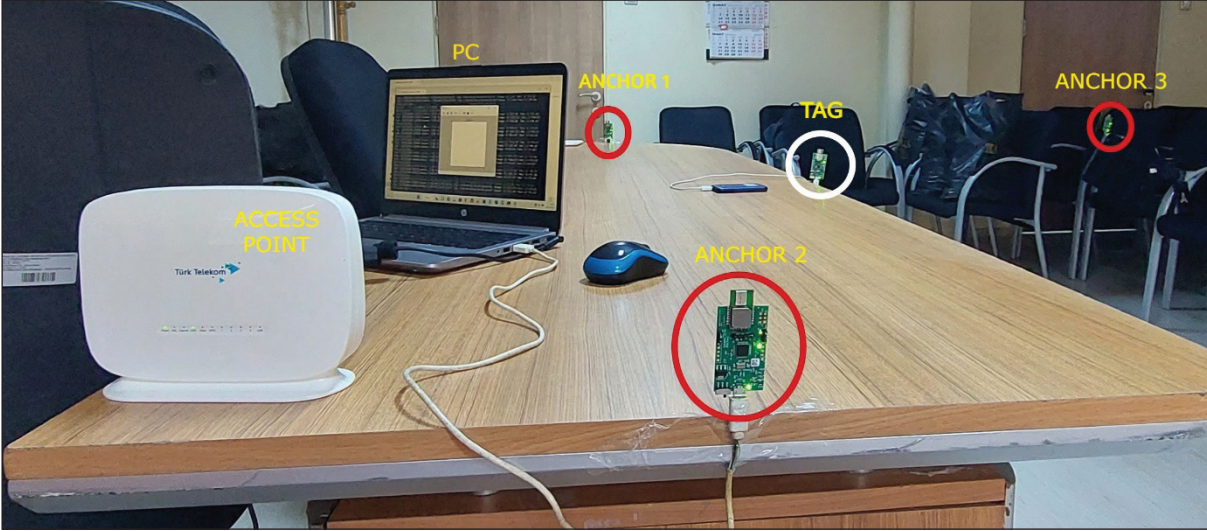
2.10. Literatür Karşılaştırması

Literatürde, kapalı alanlarda ve iç mekânlarda konum belirlenmesi konusunda yapılan bazı çalışmalar ile bu çalışmada kullanılan yöntemlerin kısa bir karşılaştırması Çizelge 1'de özetlenmiştir.

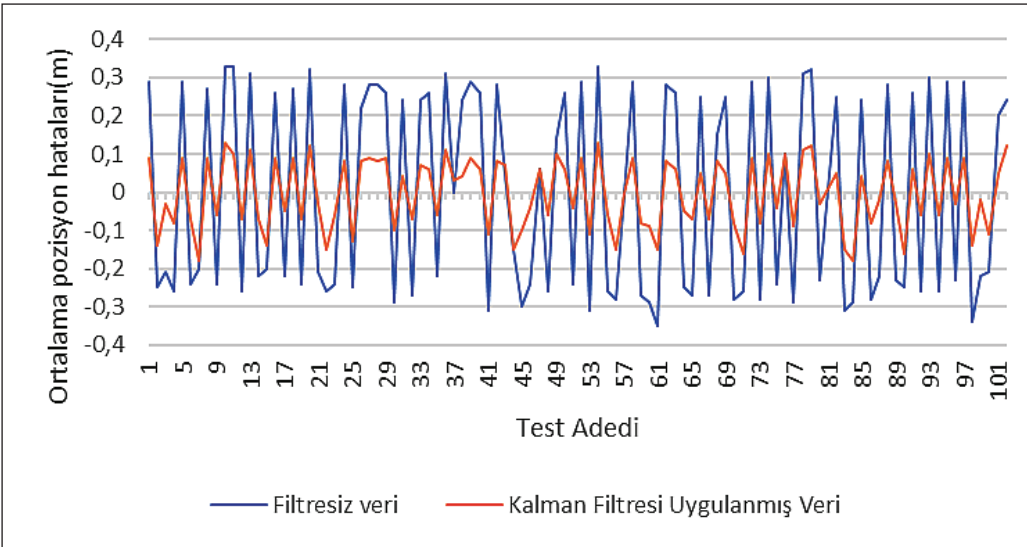
Tabloda belirtilen çalışmalar incelendiğinde ultra geniş bant teknolojisinin kapalı alan konumlandırma konusunda başarılı olduğu görülmektedir. Mesafe ölçüm teknikleri arasında zaman bazlı TDoA, konum kestirim yöntemleri arasında ise geometrik tabanlı Trilateration ön plana çıkmaktadır. Mevcut



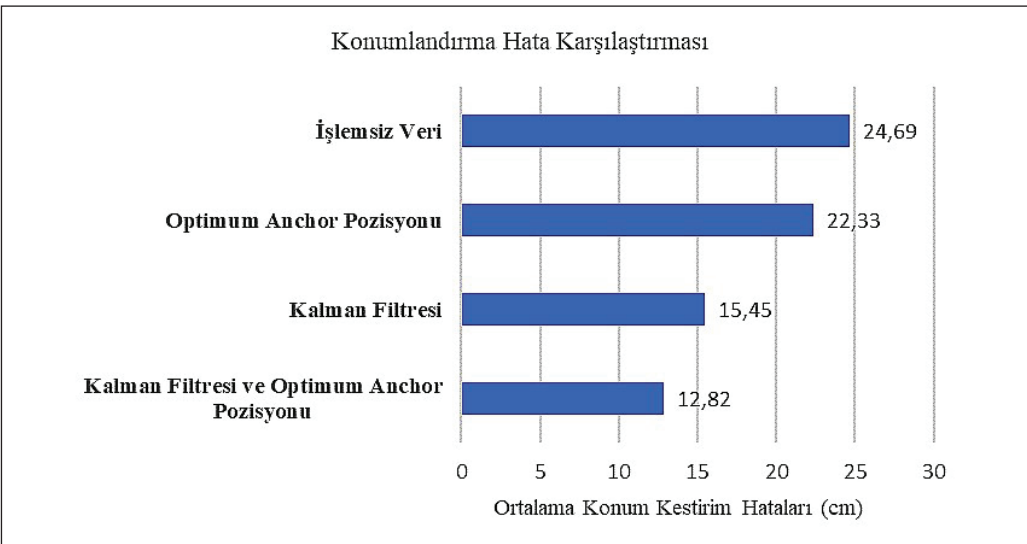
Şekil 8. Sabit referans alıcı bileşenleri.



Şekil 9. Test ortamı görseli.



Şekil 10. Filtrelenmemiş ve Kalman filtresi uygulanmış verilerin ortalama pozisyon hataları.



Şekil 11. Ortalama konum kestirim hataları kıyaslaması.

Çizelge 1. Literatür Karşılaştırması

Kaynak	Kullanılan Teknoloji	Konum Kestirim Yöntemleri	Mesafe Ölçüm ve Filtrasyon Teknikleri	Ortalama Konum Hata Mesafeleri (cm)
(Yılmaz 2010)	ZigBee	Triangulation	RSSI ve ToF	100 ila 500 cm
(Wu 2012)	RFID	Trilateration	RSSI	156 cm
(Küçük 2016)	UWB	Trilateration	TWR	30 cm
(Küçük 2017)	UWB	Trilateration	AoA ve TDoA, ilaveten HDOP, LS, NLR uygulamaları	Senaryo 1: 32 cm Senaryo 2: 23 cm
(Xu vd. 2017)	RFID	k-Nearest Neighbor ve Bayesian Olasılığı	RSSI, k-NN Algoritması, Gauss Filtresi,	±15 cm
(Artunç 2017)	UWB	Trilateration	TDoA ilaveten Median filtresi	20 cm
(Kurnaz 2019)	UWB	Trilateration	TDoA	30 cm
(Hameez 2019)	UWB	Trilateration	ToF, Makine Öğrenme Algoritmaları, Kalman Filtresi	11.27 cm
(Tekbaş vd. 2020)	ZigBee	YSA tabanlı parmak izi yöntemi (Fingerprint)	RSSI	Senaryo 1: 18.2 cm Senaryo 2: 24.2 cm
(Sheikh vd. 2021)	Wi-Fi -VLC	Trilateration	TDoA	±28.42 cm
Mevcut Çalışma	UWB	Trilateration	TDoA, Kalman Filtresi	15.45 cm

çalışma literatürde yer alan diğer çalışmalarla örtüşmekle birlikte ortalama konum hata mesafelerine göre iyi bir noktada olduğu söylenebilir.

3. Sonuçlar ve Öneriler

Yukarıda UWB teknolojisiyle kapalı alanlarda konum belirleme üzerine yapılmış uygulamalı bir çalışmasının sonuçları paylaşılmıştır. Çalışma kapsamında mesafe ölçüm yöntemi olarak TDoA ve konum tahmin yöntemi olarak Çember Kesişimi metodu seçilmiş ve uygulanmıştır. Bu işlemlerin milisaniye mertebesinde döngüler halinde sürekli devam etmesiyle gerçek zamanlı konum belirleme sistemi (RTLS) gerçekleştirilmiştir.

TDoA algoritmasıyla çok sayıda ölçüm yapılarak konum kestiriminin hata seviyeleri incelenmiştir. Belirlenen hata seviyesinin düşürülmesi ve konum kestiriminin iyileştirilmesi için sisteme Kalman filtresi uygulanmıştır. Kalman filtresi uygulanmadan elde edile konum kestirimleri ve filtre uygulanarak elde edilen konum kestirimleri kıyaslanmış Kalman filtresinin ortalama pozisyon hatasında %37,42' lik bir iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

Ayrıca sabit referans alıcıların kapalı alandaki yerleşkeleri ve duruş pozisyonlarının konum kestirimini etkilediği an-

laşıldığından farklı senaryolar test edilmiştir. Oluşturulan prototip sistemde sabit referans alıcıların dikey pozisyonda, eşit yükseklikte ve dar açılı üçgen oluşturacak şekilde deney ortamına yerleştirildiklerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sabit referans alıcıların optimum pozisyonda olması durumunda ortalama konum kestirim hatasında %9.55'lik bir iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

Sistemde en az pozisyon hatası ölçümü referans alıcıların optimum pozisyonu ve Kalman filtresi uygulanması sonucunda sağlanmış olup ortalama hata mesafesi 24.69 cm'den 12.82 cm'ye düştüğü ve ortalama konum kestirim hatasında %48.07'lik bir iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

İleride mevcut sisteme farklı filtre kombinasyonları dahil edilerek konum kestirimindeki doğruluğun artırılması planlanmaktadır. Ayrıca sabit referans alıcıların sayıları artırılarak daha hassas konum kestirimi üzerinde çalışılabilir. Bu alanda üç boyutlu uzayda konum kestirimi yapılması da ihtimal dahilindedir.

4. Teşekkürler

Bu çalışmaya yaptığı değerli katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

5. Kaynaklar

- Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrani, S., Al-Ammar, M. A., & Al-Khalifa, H. S. 2016.** Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances, *Sensors*, 16(5), 707; 2-36. <https://doi.org/10.3390/s16050707>
- Álvarez, C. N., Cintas, C. C. 2010.** Accuracy evaluation of probabilistic location methods in UWB-RFID systems, *Master Thesis*, Aalborg University, Department of Electronic Systems, Aalborg, 57-58.
- Artunç, T. C. 2017.** The design and application of an uwb-based indoor positioning system, *M. Sc. Thesis*, Istanbul Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Mechatronics Engineering, İstanbul, 11-13.
- Bai, Yuntian B. 2016.** Development of a Wi-Fi and RFID based indoor location and mobility tracking system, *Doctoral Thesis*, RMIT University, School of Mathematical and Geospatial Sciences, College of Science, Engineering and Health, Melbourne, 51-64.
- Cheng, G. 2012.** Accurate TOA-based UWB localization system in coal mine based on WSN. *Physics Procedia*, 2012(24): 534-540. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.078>
- Contractor, B. 2008.** Two dimensional localization of passive UHF RFID tags, *Doctoral Dissertation*, Wright State University, Master of Science in Computer Engineering, Dayton, 14-15.
- Cui, W., Zhang, L., Li, B., Guo, J., Meng, W., Wang, H., & Xie, L. 2018.** Received signal strength based indoor positioning using a random vector functional link network, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14 (5): 1846-1855. DOI: 10.1109/TII.2017.2760915
- Çayıröglü, İ. 2012.** Kalman filtresi ve programlama, *Fen ve Teknoloji Bilgi Paylaşımı*, 2012(1): 2-4.
- Dardari, D., Conti, A., Ferner, U., Giorgetti, A. & Win, M. Z. 2009.** Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments, *Proceedings of the IEEE*, 97(2): 404-426. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008846>
- Deak, G., Curran, K., Condell, J. 2012.** A survey of active and passive indoor localization systems, *Computer Communications*, 35(16): 1939-1954. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.06.004>
- DeSantis, V., Feliziani, M., Maradei, F. 2010.** Safety assessment of UWB radio systems for body area network by the (FDTD)-T-2 method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(8): 3245-3248. <https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2010.2046478>
- Engström, H., Helander, F. 2015.** Evaluation and testing of techniques for indoor positioning, *Master's Thesis*, Department of Electrical and Information Technology, Faculty of Engineering, LTH, Lund University, Lund, Sweden, 17s.
- Fayadh, Rashid A., Fadhil, Hilal A., Abdullah, Farah S., Malek, F., Dawood, Sameer, A. 2014.** Selective update euclidean direction search algorithm for adaptive filtering in indoor wireless rake-receiver, *IEEE 2014 International Conference on Computer, Communication, and Control Technology(I4CT 2014)*, 2-4 September 2014, Langkawi, Malaysia, 329-332. <https://dx.doi.org/10.1109/I4CT.2014.6914199>
- Hameez, M. M. Noori. 2019.** Improving the accuracy of indoor positioning system, *Master's Thesis*, Kadir Has University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Computer Engineering, İstanbul, 45-51.
- Kopta, V., Farserotu, J., Enz, C. 2017.** FM-UWB: Towards a robust, low-power radio for body area networks, *Sensors*, 17(5): 1043-1063. <https://doi.org/10.3390/s17051043>
- Kurnaz, M. 2019.** UWB ile varış zamanı farkına dayalı konum kestirimi, *Yüksek Lisans Tezi*, T.C. Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı 4-23.
- Küçük, K. 2016.** UWB haberleşme ile kapalı alanda konum tespiti, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 43-45.
- Küçük, K. 2017.** Geniş bant konum belirleme sistemi performans analizi ve iyileştirilmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1): 26-33. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.64863>
- Lee, K., Nam, Y., Min, S. D. 2018.** An indoor localization solution using Bluetooth RSSI and multiple sensors on a smartphone, *Multimedia Tools and Applications*, 77, 1-20. doi:10.1007/s11042-017-4908-2
- Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., Liu, J. 2007.** Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, *IEEE Tran. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 37(6): 1067-1080. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.905750>
- Sheikh, S. M., Asif, H. M., Raahemifar, K., Al-turjman, F. 2021.** Time difference of arrival based indoor positioning system using visible light communication, *IEEE Access*, 9, 52113-52124. <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069793>
- Tekbaş, A., Tuncer, T., Erdem, E., 2020.** RSSI sinyalleri kullanarak iç ortamda parmak izi tabanlı YSA ile konum tespitinin gerçekleştirilmesi, *DÜMF Mühendislik Dergisi* 11(3): 925-931. <https://doi.org/10.24012/dumf.692444>
- Woods, J., Radewan, C. 1977.** Kalman filtering in two dimensions. *IEEE Transactions on Information Theory*, 23(4): 473-482. <https://doi.org/10.1109/TIT.1977.1055750>
- Wu, J., 2012.** Three-dimensional indoor RFID localization system, *Doctoral Thesis*, University of Nebraska, The Graduate College at the University of Nebraska, Department of Engineering, Lincoln, 5-19.

- Xiong, H., 2010.** A novel indoor localization scheme, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 41(3): 287-295.
- Xu, H., Ding, Y., Li, P., Wang R., Li, Y., 2017.** An RFID indoor positioning algorithm based on bayesian probability and k-nearest neighbor, *Sensors (Basel)*, 17 (8): 1806. <https://dx.doi.org/10.3390/s17081806>
- Yıldırım, M. E. 2022.** RSSI based indoor localization with reduced feature dimension, *Balkan Journal Of Electrical & Computer Engineering*, 10(1): 106-109. doi:10.17694/bajece.956866
- Yılmaz, O. 2010.** Kablosuz teknolojilerle kapalı alanda konum belirleme, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Matematik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 29-46.
- Zhao, L. 2007.** Design and performance of ultra-wideband localization systems, *M. Sc. Thesis*, University of Nebraska, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Lincoln, NE. 4-9.



Paroksizmal Atriyal Fibrilasyonun 30 Dakikalık Kalp Hızı Değişkenliği Analizi Kullanılarak Teşhisinde Kalp Hızı ve Öznitelik Normalizasyon Yöntemlerinin Etkisi

The Effect of Heart Rate and Feature Normalization Methods to Diagnose Paroxysmal Atrial Fibrillation Using 30-Minute Heart Rate Variability Analysis

Murat Sürücü¹, Yalçın İşler^{2,*}, Resul Kara³

¹Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce, Türkiye

²İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

³Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

Öz

Paroksizmal Atriyal Fibrilasyon (PAF), en yaygın ritim bozukluğu türlerinden olan Atriyal Fibrilasyon'un başlangıç aşamasıdır. Doğrudan hayatı tehdit etmiyor olmasına rağmen, ölümcül rahatsızlıkları tetiklemekte ve inme riskini artırmaktadır. Bu nedenle, PAF'ın mümkün olduğunca erken teşhisi önemlidir. Bu amaçla geliştirilmiş birçok rutin test ve örüntü tanıma tabanlı çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, PAF hastalarının kalp hızı değişkenliği (KHD) analizi ile otomatik teşhisinde kalp hızı normalizasyonu ile öznitelik normalizasyonu yöntemlerinin birlikte etkisi incelenmiştir. Öncelikle, 30 dakikalık EKG kayıtlarını içeren açık erişimli Atrial Fibrillation Prediction veritabanı kullanılarak KHD verileri elde edilmiştir. Daha sonra, zaman alanı, frekans alanı, dalgacık dönüşümü ve doğrusal olmayan öznitelikler hem KHD verileri hem de kalp hızı normalize edilmiş KHD (NKHD) verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çıkarılan öznitelikler MinMax ve z-skor yöntemleri kullanılarak normalize edilmiştir. Böylece KHD ve NKHD ile elde edilen öznitelikler ile bunların normalize halleri olan bu altı öznitelik kombinasyonu, k yakın komşu (kNN) ve çok katmanlı algılayıcı (MLP) sınıflandırıcı girişlerine uygulanmıştır. Bu sınıflandırıcılarla birlikte genetik algoritma kullanılarak öznitelik seçimi yapılmıştır. KHD verilerinin kullanılması halinde, kNN algoritması kullanılarak MinMax normalizasyonu ile %81,00 sınıflandırıcı başarımına ve MLP algoritması kullanılarak z-skor normalizasyonu ile %91,92 başarıma ulaşılmıştır. Kalp hızı normalizasyonu uygulandıktan sonra, NKHD verilerinin kullanılması halinde, kNN algoritması kullanılarak z-skor normalizasyonu ile %86,00 sınıflandırıcı başarımına ve MLP algoritması kullanılarak z-skor normalizasyonu ile %95,96 başarıma ulaşılmıştır. Bu sonuçlar önceki benzer çalışmalardan daha başarılı sonuçlardır. Kalp hızı normalizasyonu, z-skor öznitelik normalizasyonu ve MLP sınıflandırıcı kombinasyonu literatürdeki otomatik PAF teşhisi çalışmalarının başarımlarını geçmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, PAF teşhisinde kalp hızı normalizasyonu yönteminin potansiyel kullanımı ispatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Paroksizmal atriyal fibrilasyon, Kalp hızı değişkenliği, Normalizasyon, Genetik algoritma, Örüntü tanıma

Abstract

Paroxysmal Atrial Fibrillation (PAF) is the initial stage of the Atrial Fibrillation that is one of the most common arrhythmia types. Although it does not threaten the life directly, it triggers the fatal disorders and it increases the risk of stroke. Therefore, it is essential to diagnose PAF as earlier as possible. For this purpose, there are many routine tests and pattern recognition based studies. In this study, we investigated the heart rate normalization method with its combination to feature normalization methods in the automatic diagnosis of PAF patients. First, Atrial Fibrillation Prediction Database, consisting of 30-minute ECG recordings and having open-access, was used to determine heart rate variability (HRV) data. Next, time-domain, frequency-domain, wavelet transform, and nonlinear features were extracted from both HRV and heart rate normalized HRV (HRN) data. These extracted features were normalized by MinMax

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: islerya@yahoo.com

Murat Sürücü orcid.org/0000-0002-9889-9952

Yalçın İşler orcid.org/0000-0002-2150-4756

Resul Kara orcid.org/0000-0001-8902-6837



and z-score methods. Hence, these six feature combinations of features directly and normalized versions from both HRV and HRN data were applied to the inputs of k-nearest neighbors (kNN) and multi-layer perceptron (MLP) classifier algorithms. Throughout the classifiers, features were selected using genetic algorithms. This study resulted in 81.00% accuracy with MinMax normalization using kNN algorithm and 91.92% accuracy with z-score normalization using MLP algorithm in HRV data. After applying the heart rate normalization, this study achieved 86.00% accuracy with z-score normalization using kNN algorithm and 95.96% accuracy with z-score normalization using MLP algorithm in HRN data. These results are higher than the other previous studies. The combination of heart rate normalization, Z-Score feature normalization, and multi-layer perceptron classifier outperforms the other studies related to automatic diagnosis of PAF in the literature. As a result of this study, we proved a new potential use of the heart rate normalization method in the diagnosis of PAF.

Keywords: Paroxysmal atrial fibrillation, Heart rate variability, Normalization, Genetic algorithm, Pattern recognition

1. Giriş

Kalp, vücudun hayatta kalması için gerekli olan kanın pompalandığı organdır (Pappano ve Wier 2019). Sağ ve sol yarısında, karıncık ve kulakçık olarak adlandırılan toplam dört kısımdan oluşur. Vücutta kirlenen kanı akciğerlere iletmek, akciğerde oksijen doygunluğuna ulaşmış kanı ise tekrar vücuda pompalama işlevini üstlenmektedir. Bu işlemleri kendi ürettiği elektriksel uyarımlarla gerçekleştirmektedir (Webster 2010).

Kalp rahatsızlıkları, ölüme sebep olan hastalıklar arasında başta gelmektedir. Avrupa kıtasındaki tüm ölümlerin yaklaşık %45'i kalp rahatsızlıkları temellidir (Wilkins vd. 2017). Atriyal fibrilasyon (AF) ise yaşamı doğrudan tehdit etmeyen en yaygın kalp ritmi bozukluğudur. Ancak bazı diğer önemli rahatsızlıkları tetiklemektedir. Örneğin inme riskini 5 kat artırmaktadır (Ryder ve Benjamin 1999). Ayrıca AF temelli inmeler daha fazla kalıcı hasara ve ölüme sebebiyet vermektedir (Steger vd. 2004). Sigara tüketimi, yüksek tansiyon, diyabet ve ileri yaşın AF gelişiminde etkisi olmaktadır. Üstelik koroner kalp hastalığı (CHD) ve kalp kapak hastalığı gibi hastalıklarla eşliğinde de AF gözlenebilmektedir (Benjamin vd. 1994).

Hayatı tehdit eden pek çok hastalık genellikle klinik olarak kolay tespit edilemeyen bir evrede başlar. Hastalıklar tedavi edilemez noktaya evrilmeden önce erken teşhiste bulunarak tedaviye başlamak, hastalığa bağlı rahatsızlık ve ölüm risklerini azaltmaktadır (Parsa vd. 2018). Benzer şekilde AF hastalarında da yaşam kalitesi ve ölüm riskinin azaltılması için erken teşhis önemlidir (Moran vd. 2016). Yakın tarihli bir çalışmada, binlerce hasta üzerinde yapılan taramalar sonucunda, klinik olarak tespit edilememiş erken teşhis AF vakalarında başlanılan erken tedavi sayesinde, 1,5 yıllık süreçte inme riskinin %4'ten %1'e, ölüm oranının ise %7'den %4'e indiği gözlenmiştir (Pothineni ve Deo 2020). Paroksizmal Atriyal Fibrilasyon (Paroxysmal Atrial Fibrillation - PAF), AF vakalarının %25 ila %62'sini içerir (Ebrahimzadeh vd.

2018). PAF, AF rahatsızlığının ilk evresi olduğundan tespiti bu sebeple oldukça önemlidir. PAF vakaları klinik olarak tespit edilebilir evreye geldiklerinde aniden rahatsızlık geliştirmekte ve bu rahatsızlık bir haftaya kadar devam edebilmektedir (Narin vd. 2018).

Tüm kalp rahatsızlıklarında olduğu gibi PAF vakalarının tespitinde de elektrokardiyografi (EKG) başta olmak üzere çeşitli fonksiyonel testler kullanılmaktadır (Soudani ve Almusallam 2018, Salinet vd. 2013). EKG çoğu klinikte bulunan hastalık teşhisinde kullanılan bir kayıt türüdür. Son zamanlarda EKG işaretlerindeki kalp atımını gösteren QRS kompleksi adı verilen tepe noktaları arasındaki değişim olarak ortaya çıkan kalp hızı değişkenliği (KHD) analizi yaygın kullanıma ulaşmıştır (Electrophysiology T. F. 1996). KHD analizi AF tespiti dışında, diyabetik otonom nöropati tanısı, enfeksiyon prognozu, ani kardiyak ölümü, damar sertliği, miyokard iskemisi, Parkinson hastalarında otonomik disfonksiyon, Konjestif kalp yetmezliği tespiti gibi klinik çalışmalarda da yaygın olarak kullanılan bir veri analizi türüdür (Chessa vd. 2002, Ahmad vd. 2009, Sessa vd. 2018, Verde ve De Pietro 2019, Goldenberg vd. 2019, Ke vd. 2017, İşler vd. 2019). KHD analizinde, ortalama, standart sapma ve benzeri zaman alanı istatistiksel hesaplamaları kullanılmaktadır (Asl vd. 2008, Tspouras ve Fotiadis 2004, Gunduz ve Talu 2023). Zaman alanındaki istatistiksel verilerin değişimi üzerine seyrek vektörlerle çalışmalar da yapılmaktadır (Maghawry vd. 2021). Ayrıca frekans bölgesi özellikleri için FFT (Fast Fourier Transform), LS (Lomb-Scargle) ve diğer periodogramlar kullanılmaktadır (Rouhani ve Soleymani 2009). Bu ölçümlerde, belirli bir frekans bölgesindeki KHD sinyalinin güç spektral yoğunluğu (PSD) öznitelik olarak kullanılmaktadır (Lip 2001). Çalışmalarda, 0 - 0,4 Hz aralığı genellikle ULF, VLF, LF ve HF şeklinde 4 bölgeye ayrılmaktadır. Ayrıca KHD verisi Gauss dağılımlı ve doğrusal olmayan bir işaret olduğundan bispektral analizle de başarılı sonuçlar elde edilmektedir (Mohebbi ve Ghassemian 2012). Bu yöntemlere ek olarak, zaman-frekans bölgesi analizi için

dalgacık dönüşümü ve dalgacık entropisi de kullanılmaktadır (Lee ve Yu 2012, Duverney vd. 2002). KHD verisine göre çizilen kalp atış hızı aralıklarının dağılım grafiği olan Poincare grafiği gibi doğrusal olmayan yöntemler de literatürde kullanılmaktadır (Park vd. 2009, Sepulveda-Suescun vd. 2017, Parsi vd. 2021, Xiong vd. 2022).

Physionet.org internet sitesindeki “The Computer in Cardiology Challenge 2001” kapsamında kullanılan “Atrial Fibrillation Prediction Database (AFPDB)” veri seti PAF tespiti başarımını ölçmede sıklıkla kullanılmaktadır (Moody vd. 2001). Literatürde AFPDB veri seti ile PAF tespitinde KHD analizi kullanılarak yapılan çalışmalarda, veri uzunluğu 5 dakikadan 30 dakikaya kadar farklı uzunluklarda ve farklı sınıflandırıcılarla pek çok çalışma yapılmıştır. Narin vd. (2016) tarafından yapılan %50 örtüşme ile 5dk uzunluktaki pencerelerle ve k en yakın komşuluk (k Nearest Neighbor - kNN) sınıflandırıcısı ile yapılan çalışmada PAF atağı öncesi tespitite %88 başarımla sağlanmıştır. Boon vd. (2018) tarafından yapılan 5dk uzunluktaki verilerde ise Destek Vektör Makinesi (DVM, Support Vector Machine - SVM) sınıflandırıcı ve Genetik Algoritma (Genetic Algorithm - GA) öznitelik seçici ile %87 başarımla sağlanmıştır. Hickey ve Heneghan (2002), Bayes yaklaşımı Doğrusal Ayırma Analizi ile %75, Boon vd. (2016, 2019) Genetik Algoritma ile öznitelik seçimi kullanılarak DVM sınıflandırıcı için sırasıyla %80 ve %86,8 başarımla elde etmişlerdir. Chesnokov (2008)’un yapmış olduğu yapay sinir ağı sınıflandırmada %82,05, Gündüz ve Talu (2023)’nun yapmış olduğu P dalgası analizi ve derin öğrenme sınıflandırıcı ile %87,65, Huang vd. (2022)’nin EKG sinyalinin SPAR analizi ile %89, Costin vd. (2013)’nin yapmış olduğu çalışmada ise karar destek sistemi ile %89,4 başarımla elde edilmiştir. 30 dakikalık veri uzunluğunda yapılan çalışmalarda ise Ozcan ve Kuntalp (2017), kNN sınıflandırıcı ile %92,2 başarımla elde etmiştir. Bunlara ilave olarak Wang vd. (2021), EKG segmentasyonu üzerine destek vektör makinesi sınıflandırmada %92,5 başarımla elde etmişlerdir.

KHD çalışmalarındaki çeşitliliğin artması sonucunda oluşturulan bir çalışma grubu tarafından KHD çalışmalarına bir standart getirilmeye çalışılmıştır. Genel kullanım için kısa süreli (5 dakika) ve uzun süreli (24 saat) KHD verileri üzerinden çalışılması tavsiye edilmiştir (Electrophysiology T.F. 1996). Bununla birlikte, yukarıdaki çalışmalarda da görüleceği üzere PAF teşhisi çalışmalarında farklı veri uzunlukları kullanılmaktadır. Şeker vd. (2000) tarafından yapılan bir çalışmada Poincare grafiği dışındaki doğrusal olmayan yöntemlerle elde edilen özniteliklerin geçerliliği test edilmiş

ve 10000 örnekten az olan KHD verilerinden elde edilen ölçümlerin sağlıklı sonuç vermediği ortaya konulmuştur. Bu nedenle, bu çalışmada 30 dakikalık KHD verileri kullanılmıştır.

Dahası, 2004 yılında yapılan bir çalışmada, Hallstorm vd. (2004) tarafından kalp hızının ortalamasının özellikle zaman alanı KHD ölçümleri üzerindeki etkisini azaltmak için kalp hızını dakikada 75 vuru gibi sabit bir değere getirilmesini önermişlerdir. Bu işlem neticesinde elde edilen KHD verisine kalp hızı normalize edilmiş KHD (NKHD) verisi denilmektedir. 2009 yılında İşler ve Kuntalp (2009) tarafından NKHD analizini konjestif kalp yetmezliği teşhisi için sınıflandırıcı başarımını artırdığı gösterilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada kalp hızı normalizasyonu ve sınıflandırıcı başarımında etkili olduğu ispat edilmiş olan öznitelik normalizasyonu yöntemleri birlikte araştırılmıştır.

Bu çalışmada, AFPDB veri setindeki 30 dakikalık uzunluğa sahip veriler üzerinden elde edilen, hem KHD hem de NKHD verilerinden elde edilen özniteliklerin üç farklı yöntemle normalizasyonu sonrasında k yakın komşuluk ve çok katmanlı ağ yapılı yapay sinir ağı ile sınıflandırılması ve sınıflandırıcı başarımlarının kıyaslanması hedeflenmiştir. Çalışmada elde edilen KHD ve NKHD verileri üzerinden sağlıklı ve PAF hastalarının ayrımı için sınıflandırma yapılmıştır.

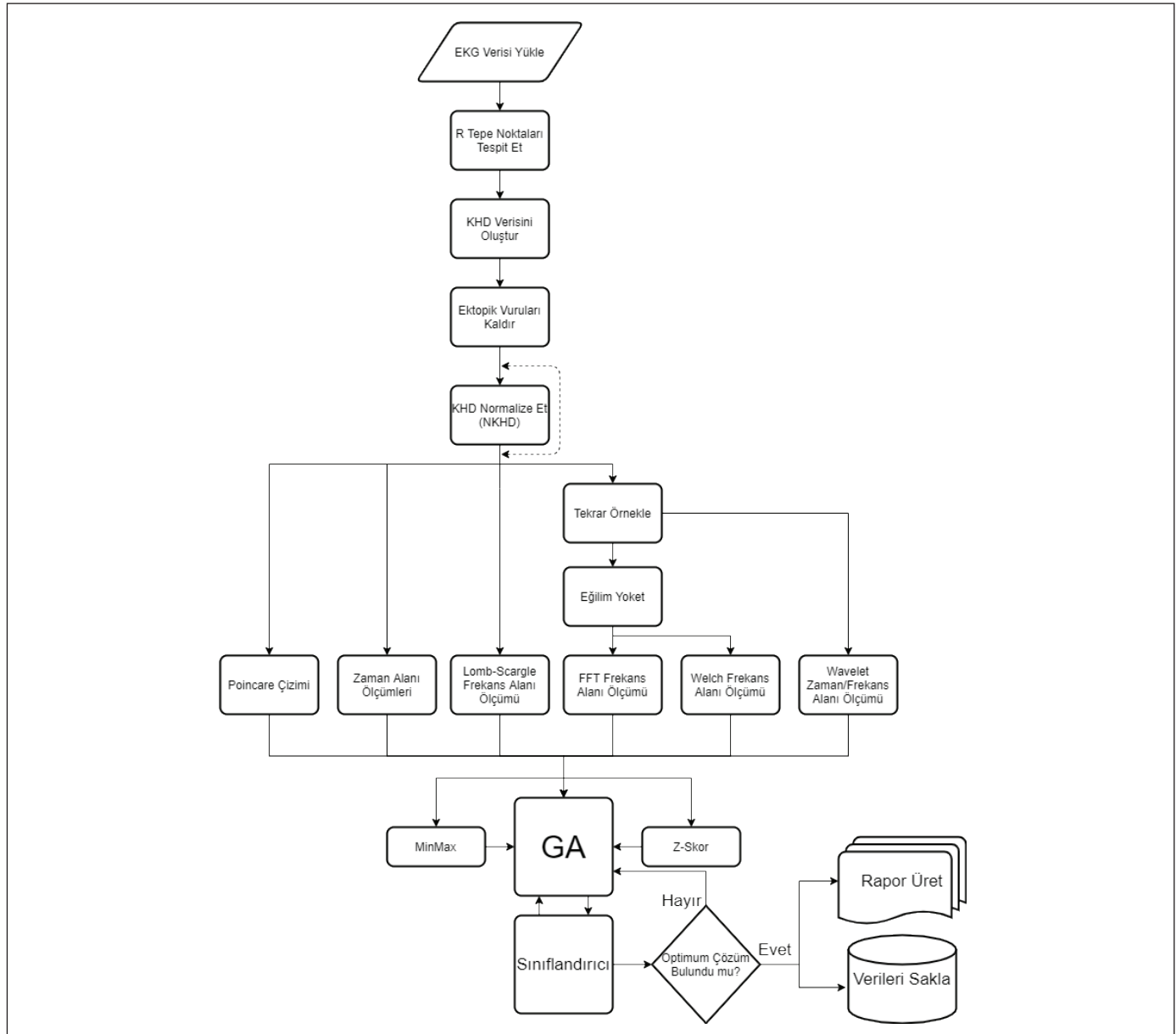
2. Gereç ve Yöntem

2.1. Tasarım

Bu çalışmada Kalp Hızı Değişkenliği verilerinin ön işlemlerden geçirilmesi ve normalize edilmesi, özniteliklerin çıkarılması, özniteliklerin normalize edilmesi, öznitelik seçimi ve son olarak da k en yakın komşuluk yöntemi ve yapay sinir ağı temelli sınıflandırıcı ile sağlıklı ve hasta ayrımının yapılması üzerine çalışılmıştır. Şekil 1’de ise kullanılan algoritma kabaca gösterilmiştir.

2.2. Verinin Elde Edilmesi

Çalışmada Physionet.org internet sitesindeki “The Computer in Cardiology Challenge 2001” kapsamında kullanılan “Atrial Fibrillation Prediction Database (AFPDB)” veri seti kullanılmıştır (Moody vd. 2001). Bu veri seti 128 Hz örnekleme frekansında 16 bit çözünürlüğe sahip iki kanal EKG verilerinden oluşmuştur. Veri seti, her biri 30 dakikalık olmak üzere, n ile başlayan 49 adet sağlıklı kişilerden alınmış EKG verisi, p ile başlayıp tek sayı ile biten 25 adet kısa süre öncesi veya sonrasında atak geçirmemiş PAF hastalarından alınmış EKG verisi ve p ile başlayıp çift sayı ile biten 25 adet



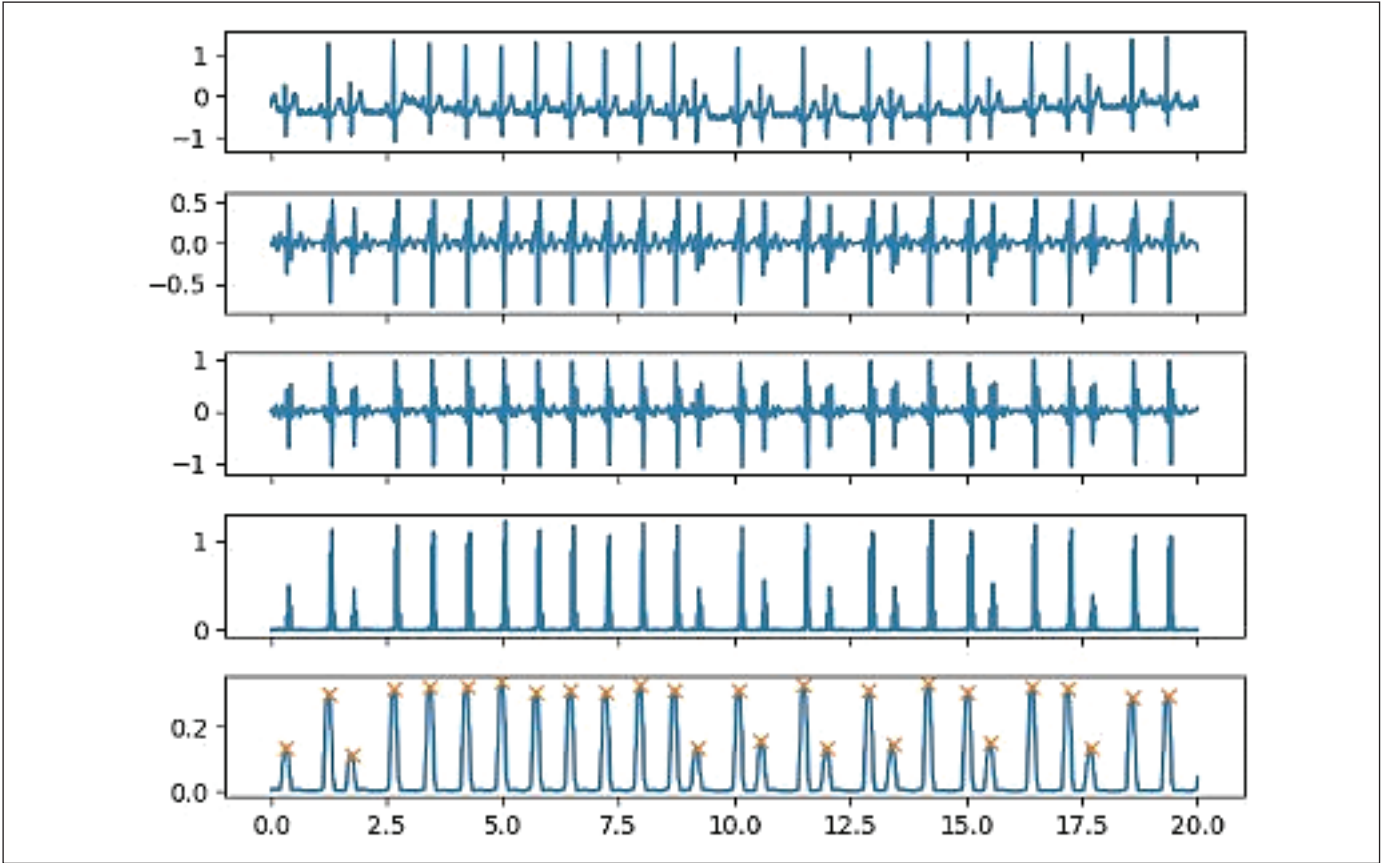
Şekil 1. Çalışmanın akış şeması.

atak geçirmek üzere olan PAF hastalarından alınmış EKG verilerinden oluşmaktadır. Bu veri setinden KHD verileri elde etmek için EKG sinyalindeki en yüksek genliğe sahip olan QRS dalgasının R tepe noktalarının tespiti yapılmıştır (Şekil 2). Tespit edilen tepe noktaları arasında geçen süre, $RR_i = R_i - R_{i-1}$, KHD verisini oluşturmaktadır.

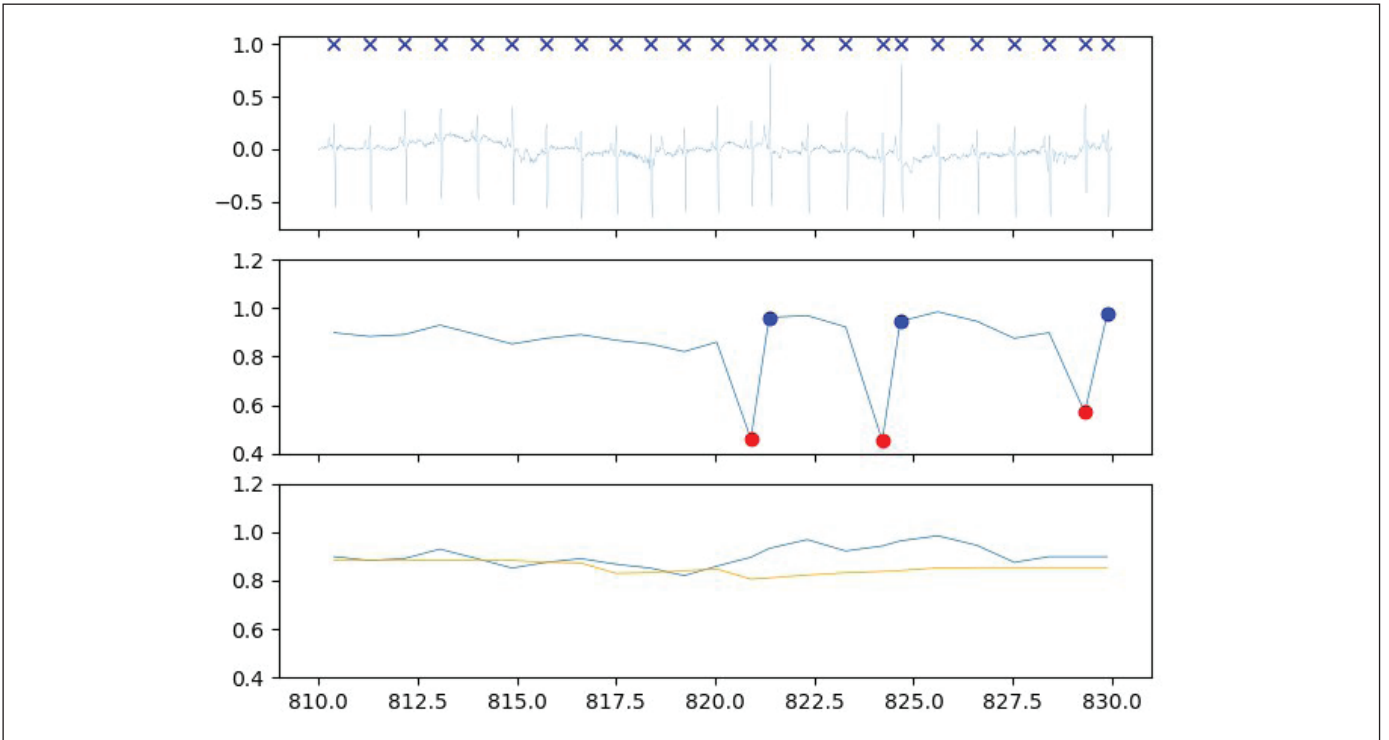
2.3. Önışlem

Ektopik vurular kalpteki SA düğümü kaynaklı olmayan vurulardır. Süreklilik arz etmeyen bu vurular sağlıklı bireylerde de oluşabildiği için önışlem olarak KHD verisinden çıkar-

rılmıştır. Bir vurunun ektopik vuru olup olmadığına karar verirken KHD değerinin ilk koşul olarak ortalama KHD değerinin %20 altına inmesi gerekmektedir. Ortalama KHD değerinin %20 altına inen şüpheli atımdan bir sonraki atım ortalama KHD değerinin ± 10 içinde kalırsa şüpheli atım, kulakçık (atrial) kaynaklı ektopik vuru olarak değerlendirilir. Eğer takip eden atım süresi ortalama KHD değerinden %30 fazlaysa şüpheli atım, karıncık (ventricular) kaynaklı ektopik vuru olmaktadır (Langley vd. 2001). Şekil 3'te ektopik vuruların tespit edilip kaldırılması sonucu KHD verisi görülmektedir.



Şekil 2. Sisteme yüklenen EKG verisinin, R tepe noktalarının tespiti.



Şekil 3. Tespit edilen ektopik vuruların kaldırılması.

2.4. Özniteliklerin Çıkarılması

Sayısal verilerle çalışılırken tüm veri seti üzerinden sistemi tasarlayıp işletmek büyük ölçüde performans kaybına sebep olabileceği gibi sistemin uygun çözümü bulmasını da imkânsız hale getirebilmektedir. Bu sebeple veri üzerinden çıkışta değişime sebep olan anahtar bilgilerin seçilmesi faydalı olmaktadır. Bu çalışmada KHD ve NKHD (Normalize edilmiş KHD) veri setlerinden zaman bölgesi istatistikleri, frekans bölgesi güç dağılımları ve buna benzer, veri hakkında genel bilgiler içeren öznitelikler çıkarılmıştır.

2.4.1. Zaman alanı ölçümleri

Zaman alanı ölçümlerinde amaç KHD verisinin zaman bölgesindeki değişimlerinin istatistiksel özelliklerini yeterince tanımlayabilmektir. Denklem (1) - (16) arasında KHD analizinde sıklıkla kullanılan zaman bölgesi ölçümleri gösterilmiştir. Burada RR veya NN, R tepe noktaları arası geçen süre veya atımlar arası geçen süre anlamında olup aynı bilgiyi işaret etmektedir. HR ise dakikadaki kalp vuruş sayısıdır. Bu çalışmada Çizelge 1'de belirtilen KHD verileri ve kalp atım sayısı verilerinden öznitelikler tanımlanmıştır.

$$MNN = RR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RR_i \quad (1)$$

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (RR_i - \overline{RR})^2} \quad (2)$$

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2} \quad (3)$$

$$SDSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (|RR_{i+1} - RR_i| - \overline{RR})^2} \quad (4)$$

$$NN50 = \sum_{i=1}^{N-1} \{ |RR_{i+1} - RR_i| > 50ms \} \quad (5)$$

$$pNN50 = \frac{NN50}{N} \times 100 \quad (6)$$

$$NN20 = \sum_{i=1}^{N-1} \{ |RR_{i+1} - RR_i| > 20ms \} \quad (7)$$

$$pNN20 = \frac{NN20}{N} \times 100 \quad (8)$$

$$MEDNN = NN_{N/2}, NN \text{ sıralı} \quad (9)$$

$$RANGENN = \max NN - \min NN \quad (10)$$

$$CVSD = \frac{RMSSD}{MNN} \quad (11)$$

$$CVNN = \frac{SDNN}{MNN} \quad (12)$$

$$MHR = \overline{HR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N HR_i \quad (13)$$

$$MAXHR = \max HR_i \quad (14)$$

$$MINHR = \min HR_i \quad (15)$$

$$SDHR = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (HR_i - \overline{HR})^2} \quad (16)$$

2.4.2. Frekans alanı ölçümleri

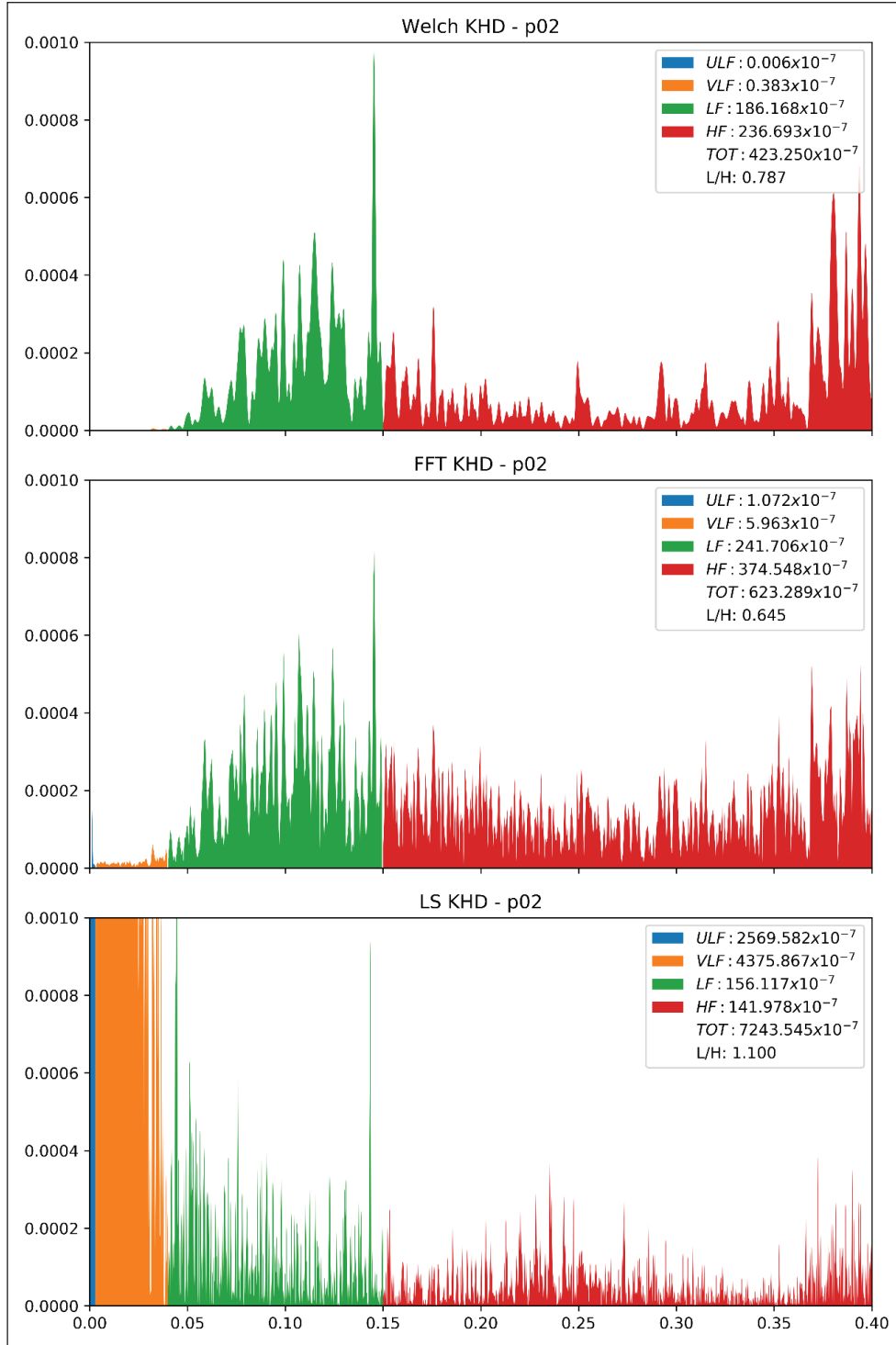
Zaman alanındaki ölçümlerin KHD verisini tek başına tem-

Çizelge 1: Zaman alanında çıkarılan öznitelikler.

Öznitelik	Açıklama
MNN (ms)	Ortalama KHD değeri
SDNN (ms)	KHD verisinin standart sapması
RMSSD (ms)	KHD değişiminin RMS değeri
SDSD (ms)	KHD değişiminin standart sapması
NN50 (adet)	KHD değişimi 50 ms den fazla olanların sayısı
PNN50 (%)	KHD değişimi 50 ms den fazla olanların oranı
NN20 (adet)	KHD değişimi 20 ms den fazla olanların sayısı
PNN20 (%)	KHD değişimi 20 ms den fazla olanların oranı
MEDNN (ms)	KHD ortanca değeri
RANGENN (ms)	KHD değişim aralığı
CVSD (ms ²)	KHD değişiminin varyasyonu
CVNN (ms ²)	KHD verisinin varyasyonu
MHR (bpm)	Kalp atış hızı ortalaması
MAXHR (bpm)	En büyük kalp atış hızı
MINHR (bpm)	En küçük kalp atış hızı
SDHR (bpm)	Kalp atış hızının standart sapması

sil etmesi mümkün değildir. Hangi değişimlerin ne sıklıkla olduğunu frekans alanı ölçümleri sayesinde tanımlayabiliriz. Literatürde KHD ile yapılan çalışmalarda frekans bölgesi, kısa süreli (5-10dk) veri uzunluklarında 3 kısma, uzun süreli (>20dk) veri uzunluklarında ise 4 kısma ayrılmıştır. Ultra çok düşük frekans (ULF) 0 - 0.003Hz aralığında, çok düşük

frekans (VLF) 0.003 - 0.04Hz aralığında, düşük frekans (LF) 0.04-0.15Hz aralığında ve son olarak yüksek frekans (HF) ise 0.15-0.4 Hz aralığında tanımlanmıştır. Bu bölge güçleri ile birlikte tüm bandın gücü ve düşük frekans bölgesinin yüksek frekans bölgesi gücüne oranı KHD frekans ölçümlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Brennan vd. 2001).



Şekil 4. Örnek bir EKG verisine ait periyodogramlar.

Söz konusu 4 frekans bandının barındırdığı güçlerle ilgili büyüklükleri öznitelik seçmek adına farklı frekans dönüşümleri/gösterimleri kullanılabilir. Bu çalışmada FFT, Welch ve Lomb-Scargle dönüşümleri, KHD işaretinin frekans alanı büyüklüklerini temsil etmesi adına kullanılmıştır. Ayrıca zaman/frekans alanı dönüşümü olan dalgacık (Wavelet) dönüşümü ile frekans bölgesi güç dağılımları hesaplanarak benzer öznitelikler dalgacık dönüşümü için de hesaplanmıştır. Ayrıca dalgacık dönüşümünde her bandın entropisi de hesaplanarak öznitelik olarak seçilmiştir. Şekil 4'te dönüşümlerle ilgili örnek periyodogramlar görülmektedir. Frekans bantlarının güç gösterimini temsil etmesi adına güç bilgileri ve entropi bilgisi 4 farklı dönüşüm metodu ile Çizelge 2'deki büyüklükler cinsinden çıkarılmıştır.

2.4.3. Poincare çizimi

Kalp atışındaki düzensizlikler gibi büyüklükler KHD verisinde doğrusal olmayan bileşenler oluşturacağı için, Poincare çiziminin bu düzensizlikleri temsil edebileceği düşünülmüştür. Şekil 5'te KHD verisi için örnek bir Poincare çizimi görülmektedir. Şekildeki noktalar o anki kalp atım aralığı ile bir önceki kalp atım aralığının ilişkisini göstermektedir. Burada SD1 ve SD2, noktalar arası mesafenin standart sapmalarından elde edilmektedir. SD1 ve SD2 oranları ve temsil ettikleri elipsin alanı sempatik ve parasempatik aktivitelere ilişkilendirilmiştir (Brennan vd. 2001).

Çizelge 2. Frekans alanında çıkarılan öznitelikler.

Öznitelik	Açıklama
P_ULF (ms ² /Hz)	ULF bölgesindeki (0-0.003Hz) güç miktarı
P_VLF (ms ² /Hz)	VLF bölgesindeki (0.003-0.04Hz) güç miktarı
P_LF (ms ² /Hz)	LF bölgesindeki (0.04-0.15Hz) güç miktarı
P_HF (ms ² /Hz)	HF bölgesindeki (0.15-0.4Hz) güç miktarı
P_TOT (ms ² /Hz)	Tüm frekans bandındaki (0-0.4Hz) güç miktarı
P_LF/P_HF	LF bölgesindeki güç miktarının HF bölgesindeki güç miktarına oranı
E_ULF (bit)	ULF bölgesi için entropi
E_VLF (bit)	VLF bölgesi için entropi
E_LF (bit)	LF bölgesi için entropi
E_HF (bit)	HF bölgesi için entropi

2.5. Öznitelik Normalizasyonu

Çıkarılan özniteliklerin büyüklükleri farklı ölçeklerde olduğu için sınıflandırıcı performansına etkileri de farklı olabilmektedir. Bu sebeple sınıflandırıcı performansına etkisini de görmek adına normalize edilmemiş özniteliklerin yanı sıra Min-Max normalizasyona ve z-skor normalizasyonuna sokulmuş özniteliklerle de ayrıca çalışılmıştır.

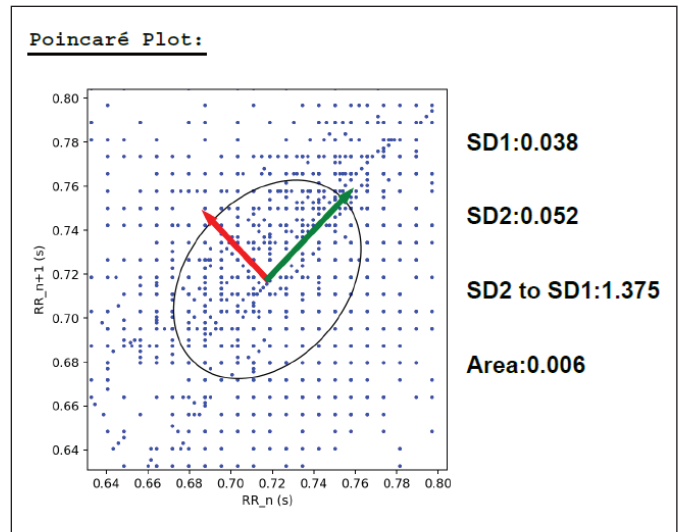
Min-Max normalizasyonunda öznitelik gruplarının her biri 0-1 aralığına indirgenmiştir. Z-skoru normalizasyonu ise öznitelik gruplarının ortalamasını 0, standart sapmasını 1 yapacak şekilde dönüştürülmesi işlemidir. Kullanılan işlemlerin formülü aşağıdaki gibidir. Burada μ ortalama değeri ve σ standart sapmayı göstermektedir (Duda vd. 2001).

$$X_{MinMax} = \frac{X - Min(X)}{Max(X) - Min(X)} \quad (17)$$

$$X_{Z-score} = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (18)$$

2.6. Öznitelik Seçimi

Örüntü tanımda tüm veri ile çalışmak yerine veriyi temsil edebilecek öznitelikleri çıkararak çalışmanın amacına benzer şekilde, tüm özniteliklerle çalışmak da hem performans hem de başarımlardan olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Ayrıca çıkarılan özniteliklerin sonuca olumlu bir katkısı da olmayabilmektedir. Bu sebeple çoğu çalışmada yapıldığı gibi bu çalışmada da öznitelikler arasından seçim işlemi yapılmıştır. Öznitelik seçimi için sıklıkla tercih edilen Genetik Algoritma kullanılmıştır.



Şekil 5. Örnek bir Poincare çizimi.

Genetik algoritma, doğadaki güçlü bireylerin hayatta kalması, güçlü bireylerden güçlü nesillerin oluşması, mutasyon ile bireylerin özelliklerinin değişmesi ve belirli bir oranda güçsüz bireylere de şans tanınması özelliklerini barındıran bir eniyileme yöntemidir. Rastlantısal özelliklerinin olması da diğer yöntemlerden ayrılmasını sağlamıştır. Genetik algoritmada özniteliklerin kullanılıp kullanılmayacağı bilgisi ikili sayı sistemi ile temsil edilmektedir. Uygunluk fonksiyonu aracılığıyla test edilen olası öznitelik grupları ile performans ölçülür ve başarılı olan bireyler kendi aralarında çaprazlanarak yeni nesiller ve bireyler oluşur. Mutasyonlar ile de başarımları iyileştirmelerinde yerel minimumlardan kurtulmak hedeflenmektedir (Duda vd. 2001).

Öznitelik seçimi için genetik algoritma kullanıldığında her birey (yani burada öznitelik) algoritma tarafından belirlenmektedir. Sınıflandırıcı girişine uygulanmak için seçilmiş olan öznitelige karşılık gelen ikili sayı basamağı "1" ve sınıflandırıcı girişine uygulanmayacak olan öznitelige karşılık gelen basamağı ise "0" ile belirlenir. Bu şekilde başlangıçta rasgele seçilen n adet olası çözümden oluşan bir popülasyon üretilmiş olur. Bu popülasyondaki her bireyin içerdiği ve olası çözüm olarak belirlenmiş olan öznitelikler, kullanılan sınıflandırıcı algoritmasının girişine uygulanır. Elde edilen sınıflandırıcı başarımları o bireylerin uygunluk değerini belirler. Genetik algoritma bu uygunluk değerlerine göre en iyi bireylerin korunması, çaprazlama yolu ile en yüksek sınıflandırıcı başarımlarına sahip bireylerin daha çok şansı olacak şekilde yeni bireylerin oluşturulması, mutasyon yolu ile rasgele küçük değişiklikler yapılması sağlanır. Popülasyondaki ortalama sınıflandırıcı başarımlarının iyileştirme artışı durana kadar algoritma defalarca çalıştırılır. Sonuç olarak verilen sınıflandırıcı algoritması için seçilen öznitelikler ve karşılık gelen sınıflandırıcı performansları rapor edilir.

2.7. Sınıflandırma

Basitten karmaşığa, denetimliden denetimsiz, eğitim aşamasına sahip olandan olmayana literatürde kullanılan pek çok sınıflandırıcı bulunmaktadır (Bulut vd. 2022; Narin vd. 2019; Surucu vd. 2021). Bu çalışmanın amacı KHD verisinin normalizasyon işlemine sokulmasının başarımları artırıp artırmadığını görmek olduğu için öncelikle basit ama etkili bir sınıflandırıcı olan kNN (k yakın komşu) sınıflandırıcı ve evrensel sınıflandırıcı olarak adlandırılan MLP (çok katmanlı algılayıcı) sınıflandırıcısı ile çalışılmıştır.

2.7.1. K Yakın Komşu

K yakın komşu (kNN) sınıflandırıcı, bir örneğin ait olduğu sınıfı veri kümesindeki en yakın k adet örneğin ait olduğu

sınıfların çoğunluğuna bakılarak tespit eden sınıflandırıcı algoritmasıdır. Ayrıntılı bilgi için, bu alanda yazılmış kitaplara bakılabilir (Duda vd. 2001).

2.7.2. Çok Katmanlı Algılayıcı

Yapay sinir ağı modelleri, her biri hesaplama modülü olan sinir hücrelerinin çeşitli yapılarıdaki bağlantılarından oluşur (Duda vd. 2001). Bunlardan en yaygın olanı, evrensel sınıflandırıcı olarak da tanımlanan çok katmanlı algılayıcı yapısıdır. Bu yapıda girdi katmanına uygulanan verilerin ait oldukları sınıflar, ara katman ve çıktı katmanındaki doğrusal olmayan hesaplama birimleri aracılığıyla hesaplanması sonucu elde edilmeye çalışılır. Ayrıntılı bilgi için, bu alanda yazılmış kitaplara bakılabilir (Duda vd. 2001).

2.8. Performans Ölçümü

Sınıflandırıcı performansının ölçülmesinde literatürde sıklıkla kullanılan Doğruluk (Accuracy), Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall veya Sensitivity) ve F1-Skor (F1 Score) kullanılmıştır (Duda vd. 2001):

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100 \quad (19)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \times 100 \quad (20)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \times 100 \quad (21)$$

$$\text{F1 - Skor} = 2 * \frac{\text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \times 100 \quad (22)$$

Bu formüllerde PAF hastalığına sahip olan ve algoritma tarafından PAF hastası olarak tanımlanan hasta sayısı TP, sağlıklı olan ve algoritma tarafından sağlıklı olarak tanımlanan birey sayısı TN, PAF hastalığına sahip olduğu halde algoritma tarafından sağlıklı olarak tanımlanan hasta sayısı FN ve sağlıklı olduğu halde algoritma tarafından hasta olarak tanımlanan birey sayısı ise FP ile gösterilmiştir.

3. Sonuçlar

KHD verileri insandan insana, hatta aynı kişi için farklı zamanlarda bile farklılık gösterdiği için PAF ataklarının veya rahatsızlığının tespitinde KHD Normalizasyonunun başarımları artırabileceği düşünülmüştür. KHD Normalizasyonunun başarımlarında bir artışa katkı sağlayıp sağlamadığını tespit etmek için AFPDB veri tabanındaki EKG kayıtları üzerinden KHD ve NKHD verileri elde edilerek sınıflandırma performansları kıyaslanmıştır. İşlemleri gerçekleştirebilmek

Çizelge 3. Kullanılan Python kütüphaneleri.

Kütüphane Adı	Versiyon	Açıklama
Flask	1.1.1	Python web server uygulaması
Flask_SQLAlchemy	2.4.1	Flask SQLAlchemy ilişkisel veritabanı eklentisi
h5py	2.10.0	Matlab dosyalarını import edebilmek için HDF5 binary dosya eklentisi
matplotlib	3.1.2	Python'da grafik, animasyon ve interaktif görsel eklentisi
numpy	1.18.1	Python bilimsel hesaplamalar kütüphanesi
plotly	4.5.0	Python'da grafik, animasyon ve interaktif görsel eklentisi
PyGAD	2.9.0	Python Genetik Algoritma uygulaması
PyWavelets	1.1.1	Python Wavelet dönüşümü kütüphanesi
scipy	1.4.1	Python mühendislik, bilim ve matematik kütüphanesi

adına Python dili tercih edilmiştir. Söz konusu sınıflandırma işlemlerinde Python 3.8 sürümü üzerinde Çizelge 3'deki kütüphaneler kullanılmıştır.

Genetik Algoritma ile öznitelik seçimi yapılırken popülasyon büyüklüğü 40, maksimum nesil sayısı 40, maksimum iyileştirme olmayan nesil sayısı 10 seçilmiştir. Genetik Algoritma ile öznitelik seçimi neticesinde zaman alanı özniteliklerinden MNN, SDNN, SDS, PNN20, MAXHR ve MINHR, FFT algoritması tabanlı frekans alanı özniteliklerinden FFT_ULF, FFT_HF ve FFT_TOTAL, Welch periyodogram tabanlı frekans alanı özniteliklerinden WELCH_ULF ve WELCH_TOTAL, Lomb-Scargle periyodogram tabanlı frekans alanı özniteliklerinin hiçbiri, Dalgacık enerjisi tabanlı frekans alanı özniteliklerinden WT_ULF ve WT_LF, Dalgacık entropisi tabanlı frekans alanı özniteliklerinden hiçbiri ile Poincare grafiği tabanlı doğrusal olmayan özniteliklerden PC-SD2, PC_SD2SD1 ve PC_AREA özniteliklerinin sınıflandırıcı başarımlarında etkili oldukları tespit edilmiştir.

En yakın komşuluk sınıflandırmada k değeri 1 ile 23 arasındaki tek sayılar seçilmiştir. Çok katmanlı ağ modelinde ise ara katmanda 30 nöron kullanılmıştır. Yazılan uygulama, öncelikle AFPDB veri tabanı dosyalarını okuyup MySQL veri tabanına yüklemesini sağlamaktadır. Yüklenen ham verilerden KHD ve NKHD verileri oluşturulup her veri seti için öznitelikler çıkartılmış, öznitelikler ve özniteliklerin MinMax ile z-skor normalize edilmiş halleri veri tabanına saklanmıştır. Sonrasında genetik algoritma aracılığıyla ve kNN sınıflandırma ile k=1,3,5,...,23 değerleri için optimum öznitelik seçimleri bulunmuş ve KHD ile NKHD veri setlerinin her biri için normalize edilmiş ve edilmemiş 6 farklı veri setinin performansı test edilmiştir. Çalışma hem kNN

sınıflandırıcısı hem de çok katmanlı ağ modeli yapay sinir ağı için tekrarlanmış ve elde edilen sınıflandırıcı performans ölçümleri tablo halinde sunulmuştur (Çizelge 4).

Buna göre, kNN algoritması girişlerine KHD öznitelikleri uygulanması halinde MinMax öznitelik normalizasyonu ile %81,0 ve NKHD öznitelikleri uygulanması halinde Z-Skor öznitelik normalizasyonu ile %86,0 sınıflandırıcı doğruluğuna ulaşılmaktadır. Benzer şekilde, çok katmanlı algılayıcı algoritması girişlerine KHD öznitelikleri uygulanması halinde Z-Skor öznitelik normalizasyonu ile %91,9 ve NKHD öznitelikleri uygulanması halinde Z-Skor öznitelik normalizasyonu ile %95,9 sınıflandırıcı doğruluğuna ulaşılmaktadır. Bu durumda, hem kalp hızı normalizasyonu kullanılması hem de bu yolla elde edilen özniteliklere normalizasyon uygulanması halinde PAF teşhisinde daha başarılı sonuçlara ulaşılabildiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki 30 dakikalık veri uzunluğuna sahip diğer çalışmalarda elde edilen sınıflandırıcı doğrulukları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 5). Buna göre, NKHD ve KHD ölçümlerinin Z-Skor yöntemiyle normalize edildiği özniteliklerin seçildiği çok katmanlı ağ modeli kullanıldığında literatürdeki benzer çalışmalardan daha yüksek bir sınıflandırıcı doğruluğuna ulaşıldığı görülmektedir.

4. Tartışma

Çalışmada Physionet.org internet sitesindeki "The Computer in Cardiology Challenge 2001" kapsamında kullanılan "Atrial Fibrillation Prediction Database (AFPDB)" veri seti kullanılmıştır. Veri setinde bulunan EKG verilerinden KHD verileri elde edilmiş, bu verilerden ve bu verilerin normalize edilmesinden öznitelikler çıkartılmıştır. Oluşan öznitelik

Çizelge 4. PAF hastası tespitinde kalp hızı ve öznitelik normalizasyonlarının etkisi ve karışıklık matrisleri.

Sınıflandırıcı	Veri Türü	Normalizasyon	TP	FN	FP	TN	Doğruluk (%)	Kesinlik (%)	Duyarlılık (%)	F1-Skor (%)
k Yakın Komşuluk	KHD	Yok	41	9	16	34	75,00	82,00	71,93	76,64
		Min-Max	42	8	11	39	81,00	84,00	79,25	81,55
		Z-Skor	39	11	9	41	80,00	78,00	81,25	79,59
	NKHD	Yok	41	9	11	39	80,00	82,00	78,85	80,39
		Min-Max	43	7	8	42	85,00	86,00	84,31	85,15
		Z-Skor	44	6	8	42	86,00	88,00	84,62	86,27
Çok Katmanlı Algılayıcı	KHD	Yok	31	19	4	46	76,77	62,00	88,57	72,94
		Min-Max	44	6	7	43	86,87	88,00	86,27	87,13
		Z-Skor	45	5	3	47	91,92	90,00	93,75	91,84
	NKHD	Yok	39	11	13	37	75,76	78,00	75,00	76,47
		Min-Max	37	13	3	47	83,84	74,00	92,50	82,22
		Z-Skor	48	2	2	48	95,96	96,00	96,00	96,00

Çizelge 5. PAF hastalarının tespitine yönelik 30 dakikalık verilerle çalışan literatür taraması sonuçları ve bu çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılması.

Çalışma	Öznitelikler	Sınıflandırıcı	Doğruluk (%)
Hickey ve Heneghan (2002)	Atriyal ektopik vuru sayısı ve KHD güç spektral yoğunluğu	Doğrusal ayırma analizi	75,00
Boon vd. (2016)	KHD ve Poincare çizimi	Destek vektör makinesi	80,00
Chesnokov (2008)	KHD spektral ve entropi analizi	Çok katmanlı algılayıcı	82,05
Boon vd. (2019)	KHD öznitelikleri	Destek vektör makinesi	86,80
Gündüz ve Talu (2023)	P dalgası analizi	Derin öğrenme	87,65
Huang vd. (2022)	EKG sinyali analizi	SPAR analizi	89,00
Costin vd. (2013)	KHD ve Morfolojik değişken (QRS uzunluğu) öznitelikleri	Karar destek sistemi	89,40
Özcan ve Kuntalp (2017)	KHD öznitelikleri	k yakın komşuluk	92,20
Wang vd. (2021)	EKG segmentasyon	Destek vektör makinesi	92,50
Bu çalışma	KHD öznitelikleri	k yakın komşuluk	81,00
Bu çalışma	NKHD öznitelikleri	k yakın komşuluk	86,00
Bu çalışma	KHD öznitelikleri	Çok katmanlı algılayıcı	91,92
Bu çalışma	NKHD öznitelikleri	Çok katmanlı algılayıcı	95,96

veri gruplarının da normalize edilmiş ve edilmemiş halleri ile toplam altı farklı öznitelik veri seti oluşturulmuştur. Oluşan öznitelikler üzerinden Genetik Algoritma ile öznitelik seçimi yapılarak hem kNN hem de çok katmanlı algılayıcı sınıflandırıcı algoritmaları ile sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Yapılan sınıflandırma işlemi sonrası KHD verisinin nor-

malize edilmesinin belirli şartlar altında başarımı artırdığı görülmüştür. Öznitelik normalizasyonu ise hem KHD, hem de NKHD için başarımı artırmıştır.

NKHD verilerinin kullanılmasının, literatürdeki diğer sınıflandırıcı ve öznitelik seçimi kullanan çalışma metodlarında da başarımı artıracağı düşünülmektedir.

5. Kaynaklar

- Ahmad, S., Tejuja, A., Newman, K. D., Zarychanski, R., & Seely, A. J. 2009.** Clinical review: a review and analysis of heart rate variability and the diagnosis and prognosis of infection. *Critical care (London, England)*, 13: 232. <https://doi.org/10.1186/cc8132>
- Asl, B. M., Setarehdan, S. K., Mohebbi, M. 2008.** Support vector machine-based arrhythmia classification using reduced features of heart rate variability signal, *Artificial Intelligence in Medicine*, 44: 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2008.04.007>
- Benjamin, E. J., Levy, D., Vaziri, S. M., D'Agostino, R. B., Belanger, A. J., Wolf, P. A. 1994.** Independent risk factors for atrial fibrillation in a population-based cohort. The Framingham Heart Study. *JAMA*, 271: 840-844.
- Boon, K. H., Khalil-Hani, M., Malarvili, M. B., Sia, C. W. 2016.** Paroxysmal Atrial Fibrillation Prediction Method with Shorter HRV Sequences. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Elsevier BV, 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.07.016>.
- Boon, K. H., Khalil-Hani, M., Malarvili, M. B. 2018.** Paroxysmal Atrial Fibrillation Prediction Based on HRV Analysis and Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm III. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 153: 171-184. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.10.012>
- Boon, K.H., Khalil-Hani, M., Sia, C.W. 2019.** Paroxysmal Atrial Fibrillation Onset Prediction Using Heart Rate Variability Analysis and Genetic Algorithm for Optimization, In *Proceedings of the International Conference on Data Engineering*, 609-617. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1799-6_62
- Brennan, M., Palaniswami, M., Kamen, P. 2001.** Do Existing Measures of Poincare Plot Geometry Reflect Nonlinear Features of Heart Rate Variability?. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 48: 1342-1347. <https://doi.org/10.1109/10.959330>.
- Bulut, A., Ozturk, G., Kaya, I. 2022.** Classification of sleep stages via machine learning algorithms. *Journal of Intelligent Systems with Applications*, 5(1): 66-70. <https://doi.org/10.54856/jiswa.202205210>
- Chesnokov, Yuriy V. 2008.** Complexity and spectral analysis of the heart rate variability dynamics for distant prediction of paroxysmal atrial fibrillation with artificial intelligence methods. *Artificial Intelligence in Medicine*, 43/2: 151-165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.artmed.2008.03.009>.
- Chessa, M., Butera, G., Lanza, G. A., Bossone, E., Delogu, A., De Rosa, G., Marietti, G., Rosti, L., Carminati, M. 2002.** Role of Heart Rate Variability in the Early Diagnosis of Diabetic Autonomic Neuropathy in Children. *Herz, Springer Science and Business Media LLC*, 27: 785-790. <https://doi.org/10.1007/s00059-002-2340-4>.
- Costin, H., Rotariu, C., Pasarica, A. 2013.** Atrial fibrillation onset prediction using variability of ECG signals. *2013 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), IEEE*. 1-4 <https://doi.org/10.1109/atee.2013.6563419>.
- Duda, R.O., Hart, P.E., Stork, D.G. 2001.** *Pattern Classification*, 2. Basım, John Wiley & Sons, New York, 688s.
- Duverney, D., Gaspoz, J.-M., Pichot, V., Roche, F., Brion, R., Antoniadis, A., Barthelemy, J.-C. 2002.** High Accuracy of Automatic Detection of Atrial Fibrillation Using Wavelet Transform of Heart Rate Intervals. *Pacing and Clinical Electrophysiology, Wiley*, 25: 457-462. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9592.2002.00457.x>.
- Ebrahimzadeh, E., Kalantari, M., Joulani, M., Shahraki, R. S., Fayaz, F., Ahmadi, F. 2018.** Prediction of paroxysmal Atrial Fibrillation: A machine learning based approach using combined feature vector and mixture of expert classification on HRV signal. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 165: 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.07.014>
- Electrophysiology, T. F. of the E. S. of C. the N. A. 1996.** Heart Rate Variability. *Circulation*, 93: 1043-1065. <https://doi.org/10.1161/01.cir.93.5.1043>
- Goldenberg, I., Goldkorn, R., Shlomo, N., Einhorn, M., Levitan, J., Kuperstein, R., Klempfner, R., Johnson, B. 2019.** Heart Rate Variability for Risk Assessment of Myocardial Ischemia in Patients without Known Coronary Artery Disease: The HRV-DETECT Study. *Journal of the American Heart Association*. <https://doi.org/10.1161/jaha.119.014540>.
- Gunduz, A. F., Talu, M. F. 2023.** Atrial fibrillation classification and detection from ECG recordings, *Biomedical Signal Processing and Control*, 82:104531. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104531>
- Hallstrom, A. P., Stein, P. K., Schneider, R., Hodges, M., Schmidt, G., Ulm, K. 2004.** Structural Relationships Between Measures Based on Heart Beat Intervals: Potential for Improved Risk Assessment. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, IEEE*, 51: 1414-1420. <https://doi.org/10.1109/tbme.2004.828049>
- Hickey, B., Heneghan, C. 2002.** Screening for paroxysmal atrial fibrillation using atrial premature contractions and spectral measures, *Computers in Cardiology*, 29:217-220, <https://doi.org/10.1109/cic.2002.1166746>

- Huang, Y. H., Lyle, J. V., Ab Razak, A. S., Nandi, M., Marr, C. M., Huang, C. L.-H., Aston, P. J., Jeevaratnam, K. 2022.** Detecting paroxysmal atrial fibrillation from normal sinus rhythm in equine athletes using Symmetric Projection Attractor Reconstruction and machine learning. *Cardiovascular Digital Health Journal*, 3:96–106. <https://doi.org/10.1016/j.cvdhj.2022.02.001>
- Isler, Y., Kuntalp, M. 2009.** Heart rate normalization in the analysis of heart rate variability in congestive heart failure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, SAGE Publications, 224: 453–463. <https://doi.org/10.1243/09544119jeim642>.
- Isler, Y., Narin, A., Ozer, M., Perc, M. 2019.** Multi-stage classification of congestive heart failure based on short-term heart rate variability. *Chaos, Solitons & Fractals*, Elsevier BV, 118: 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.11.020>
- Ke, J.-Q., Shao, S.-M., Zheng, Y.-Y., Fu, F.-W., Zheng, G.-Q., Liu, C.-F. 2017.** Sympathetic skin response and heart rate variability in predicting autonomic disorders in patients with Parkinson disease. *Medicine*, 96: e6523. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000006523>
- Langley, P., di Bernardo, D., Allen, J., Bowers, E., Smith, F. E., Vecchiotti, S., Murray, A. 2001.** Can paroxysmal atrial fibrillation be predicted? *Computers in Cardiology*. 28:121–124, <https://doi.org/10.1109/cic.2001.977606>.
- Lee, M.Y., Yu, S.N. 2012.** Multiscale sample entropy based on discrete wavelet transform for clinical heart rate variability recognition. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 4299–4302, <https://doi.org/10.1109/embc.2012.6346917>, 2012.
- Lip, G. Y. H. 2001.** Paroxysmal atrial fibrillation. *QJM*, 94: 665–678. <https://doi.org/10.1093/qjmed/94.12.665>
- Maghawry, E., Ismail, R., Gharib, T. F. 2021.** An efficient approach for Paroxysmal Atrial Fibrillation events prediction using Extreme Learning Machine. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40:5087–5099. <https://doi.org/10.3233/jifs-201832>
- Mohebbi, M., Ghassemian, H. 2012.** Prediction of paroxysmal atrial fibrillation based on non-linear analysis and spectrum and bispectrum features of the heart rate variability signal. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Elsevier BV, 105: 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2010.07.011>.
- Moody, G., Goldberger, A., McClennen, S., Swiryn, S. 2001.** Predicting the onset of paroxysmal atrial fibrillation: The Computers in Cardiology Challenge 2001, 28: 113–116. <https://doi.org/10.1109/cic.2001.977604>
- Moran, P. S., Teljeur, C., Harrington, P., Smith, S. M., Smyth, B., Harbison, J., Normand, C., Ryan, M. 2016.** Cost-Effectiveness of a National Opportunistic Screening Program for Atrial Fibrillation in Ireland. *Value in Health*, Elsevier BV, 19: 985–995. <https://doi.org/10.1016/j.jval.2016.07.007>
- Narin, A., Isler, Y., Ozer, M. 2016.** Early prediction of Paroxysmal Atrial Fibrillation using frequency domain measures of heart rate variability. *Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)*, IEEE, 1-4 <https://doi.org/10.1109/tiptekno.2016.7863110>
- Narin, A., Isler, Y., Ozer, M., Perc, M. 2018.** Early prediction of paroxysmal atrial fibrillation based on short-term heart rate variability. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 509:56–65. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.06.022>
- Narin, A., Isler, Y., Ozer, M. 2019.** Early prediction of paroxysmal atrial fibrillation using wavelet transform methods. *Journal of Intelligent Systems with Applications*, 2(2): 111–114. <https://doi.org/10.54856/jiswa.201912077>
- Ozcan, N., Kuntalp, M. 2017.** Determining best HRV indices for PAF screening using genetic algorithm, 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering
- Pappano, A.J., Wier, W.G. 2019.** *Cardiovascular Physiology*, 11. Basım, Elsevier, 300s.
- Park, J., Lee, S., Jeon, M. 2009.** Atrial fibrillation detection by heart rate variability in Poincare plot. *BioMedical Engineering OnLine*, Springer Science and Business Media LLC., 8:38, <https://doi.org/10.1186/1475-925x-8-38>
- Parsa, S. F., Vafajoo, A., Rostami, A., Salarian, R., Rabiee, M., Rabiee, N., Rabiee, G., Tahriri, M., Yadegari, A., Vashae, D., Tayebi, L., Hamblin, M. R. 2018.** Early diagnosis of disease using microbead array technology: A review. *Analytica Chimica Acta*, 1032: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.05.011>
- Parsi, A., Glavin, M., Jones, E., Byrne, D. 2021.** Prediction of paroxysmal atrial fibrillation using new heart rate variability features. *Computers in Biology and Medicine*, 133:104367. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2021.104367>
- Pothineni, N. V. K., Deo, R. 2020.** Screening for Atrial Fibrillation. *Circulation*, 135: 1523–1526. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.120.046298>.
- Rouhani, M., Soleymani, R. 2009.** Neural Networks Based Diagnosis of Heart Arrhythmias Using Chaotic and Nonlinear Features of HRV Signals. 2009 International Association of Computer Science and Information Technology - Spring Conference, 545–549. <https://doi.org/10.1109/iacsit-sc.2009.23>
- Ryder, K.M., Benjamin, E.J. 1999.** Epidemiology and significance of atrial fibrillation. *The American Journal of Cardiology*, 84: 131–138. [https://doi.org/10.1016/s0002-9149\(99\)00713-4](https://doi.org/10.1016/s0002-9149(99)00713-4)

- Salinet, J. L., Madeiro, J. P. V., Cortez, P. C., Stafford, P. J., André Ng, G., Schlindwein, F. S. 2013.** Analysis of QRS-T subtraction in unipolar atrial fibrillation electrograms. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 51: 1381–1391. <https://doi.org/10.1007/s11517-013-1071-4>
- Seker, R., Saliu, S., Birand, A., Kudaiberdieva, G. 2000.** Validity test for a set of nonlinear measures for short data length with reference to short-term heart rate variability signal, *Journal of Systems Integration*, 10: 41–53. <https://doi.org/10.1023/A:1026507317626>
- Sepulveda-Suescun, J. P., Murillo-Escobar, J., Urda-Benitez, R. D., Orrego-Metaute, D. A., Orozco-Duque, A. 2017.** Atrial fibrillation detection through heart rate variability using a machine learning approach and Poincare plot features. VII Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB, 60: 565–568. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4086-3_142
- Sessa, F., Anna, V., Messina, G., Cibelli, G., Monda, V., Marsala, G., Ruberto, M., Biondi, A., Cascio, O., Bertozzi, G., Pisanelli, D., Maglietta, F., Messina, A., Mollica, M. P., Salerno, M. 2018.** Heart rate variability as predictive factor for sudden cardiac death. *Aging, Impact Journals*, 10: 166–177. <https://doi.org/10.18632/aging.101386>
- Soudani, A., Almusallam, M. 2018.** Atrial Fibrillation detection based on ECG-Features Extraction in WBSN. *Procedia Computer Science*, 130: 472–479. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.052>
- Steger, C., Pratter, A., Martinekbregel, M., Avanzini, M., Valentin, A., Slany, J., Stollberger, C. 2004.** Stroke patients with atrial fibrillation have a worse prognosis than patients without: data from the Austrian Stroke registry. *European Heart Journal*, 25: 1734–1740. <https://doi.org/10.1016/j.ehj.2004.06.030>
- Surucu, M., Isler, Y., Perc, M., Kara, R. 2021.** Convolutional neural networks predict the onset of paroxysmal atrial fibrillation: Theory and applications. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 31(11): 113119. <https://doi.org/10.1063/5.0069272>
- Tsipouras, M. G., Fotiadis, D. I. 2004.** Automatic arrhythmia detection based on time and time–frequency analysis of heart rate variability. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 74: 95–108. [https://doi.org/10.1016/s0169-2607\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/s0169-2607(03)00079-8)
- Verde, L., De Pietro, G. 2019.** A neural network approach to classify carotid disorders from Heart Rate Variability analysis. *Computers in Biology and Medicine*, 109: 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.04.036>
- Wang, L.-H., Yan, Z.-H., Yang, Y.-T., Chen, J.-Y., Yang, T., Kuo, I.-C., Abu, P. A. R., Huang, P.-C., Chen, C.-A., Chen, S.-L. 2021.** A Classification and Prediction Hybrid Model Construction with the IQPSO-SVM Algorithm for Atrial Fibrillation Arrhythmia. *Sensors*, 21:5222. <https://doi.org/10.3390/s21155222>
- Webster, G. 2010.** *Medical Instrumentation: Application and Design*, 4. Edition, Wiley, 675s.
- Wilkins, E., Wilson, L., Wickramasinghe, K., Bhatnagar, P., Leal, J., Luengo-Fernandez, R., Burns, R., Rayner, M., Townsend, N. 2017.** *European Cardiovascular Disease Statistics*, European Heart Network
- Xiong, P., Li, J., Liu, M., Zhang, J., Yang, J., Zhang, H., Du, H., Liu, X. 2022.** Short-Term Paroxysmal Atrial Fibrillation Detection with Intra- and Inter-Patient Paradigm Based on R-R Intervals. *SSRN Electronic Journal*, <https://doi.org/10.2139/ssrn.4098697>



Development of a New Operation Strategy Enabling Transactions of Flexibility Among Households for a Residential Neighborhood

Evsel Bir Mahalli Alan İçin Evler Arasında Esneklik Alışverişine İmkân Sağlayan Yeni Bir İşletim Stratejisinin Geliştirilmesi

F. Gülşen Erdinç 

Istanbul Gelişim University, Department of Electrical-Electronics Engineering, Avcılar, İstanbul, Turkey

Abstract

This study proposes a novel energy management strategy for residential neighborhoods that enables peer-to-peer energy transactions among households without the need for energy storage or distributed generation. The proposed strategy is based on a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) optimization model that minimizes the overall cost per household, including energy consumption cost, flexibility procurement cost, flexibility selling gain, and penalty cost caused by exceeding the limits. The strategy aims to optimize the energy consumption and production patterns of households with just inverter-based air conditioner loads, while also ensuring that the overall load limit for the neighborhood is not exceeded during certain periods. The results of the MILP-based optimization model demonstrate that the proposed strategy can significantly reduce the overall cost per household, providing a more efficient and cost-effective energy system for residential neighborhoods. The strategy utilizes a flexible energy trading platform, with a pricing mechanism designed to incentivize households to optimize their energy consumption and production patterns and support the transition to a low-carbon energy future.

Keywords: Energy management, Flexibility trading, Inverter air-conditioners, Residential neighborhood

Öz

Bu çalışmada, enerji depolama veya dağıtık üretim ihtiyacı olmadan evsel bir mahalli olan için evler arası enerji işlemlerine olanak tanıyan yeni bir enerji yönetimi stratejisi önermektedir. Önerilen strateji, enerji tüketim maliyeti, esneklik sağlama maliyeti, esneklik satış kazancı ve limitleri aşmadan kaynaklanan ceza maliyeti de dahil olmak üzere, genel maliyeti ev başına en aza indiren Karışık Tamsayılı Lineer Programlama optimizasyon modeline dayanmaktadır. Strateji, sadece inverter tabanlı klima yükleri ile evlerin enerji tüketim ve üretim desenlerini optimize etmeyi amaçlarken, aynı zamanda belirli dönemlerde mahalle genel yük limitinin aşılmamasını da sağlamaktadır. Karışık Tamsayılı Lineer Programlama tabanlı optimizasyon modelinin sonuçları, önerilen stratejinin ev başına genel maliyeti önemli ölçüde azaltabileceğini, böylece evsel mahalli alanlar için daha verimli ve maliyet etkin bir enerji sistemi sağlayabileceğini göstermektedir. Strateji, esnek bir enerji ticaret platformu kullanmakta ve düşük karbonlu bir enerji geleceğine geçişi desteklemek için tasarlanmış bir fiyatlandırma mekanizması ile evlerin enerji tüketim ve üretim desenlerini optimize etmelerini teşvik etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enerji yönetimi, Esneklik ticareti, Evsel mahalli alan, İnverter tabanlı klimalar

1. Introduction

With the increasing demand for energy and the rising concerns over environmental sustainability, the need for an efficient and cost-effective energy system is becoming increas-

ingly important. Residential neighborhoods, which account for a significant portion of the total energy consumption, offer a potential opportunity for optimizing energy consumption and reducing energy costs (Nematchoua et al. 2021).

Effective energy management in residential neighborhoods is critical in achieving energy sustainability and reducing carbon emissions. The implementation of new energy management strategies can help to reduce peak demand, balance the electricity grid, and reduce the need for new power plants. Additionally, energy management can pro-

*Corresponding author: fgulsenerdinc@gmail.com

F. Gülşen Erdinç  orcid.org/0000-0002-2027-8689



vide a significant economic benefit by reducing energy bills for households and businesses, and potentially reducing the overall cost of electricity for the entire community (Gholinejad et al. 2021).

Effective energy management in residential neighborhoods can be enhanced by implementing innovative technologies and concepts. One of these concepts is the use of small local market platforms that enable residential end-users to trade their excess power and even their demand flexibility. These platforms can utilize different technologies, including blockchain-based peer-to-peer (P2P) trading, to facilitate secure and transparent transactions between households. By using these platforms, households can buy and sell energy based on their needs and preferences, and the energy transactions can be tracked and verified through the blockchain technology. This approach can enable households to participate in the energy market and earn additional income by selling their excess power, while also reducing their energy bills by purchasing energy from other households at lower prices. Furthermore, by trading their demand flexibility, households can also contribute to the grid stability and support the integration of renewable energy sources. Therefore, the use of local market platforms can be an effective way to enhance energy management in residential neighborhoods and support the transition to a more sustainable energy system (Wu et al. 2022).

Many studies dealing with the development of various optimization-based energy management concepts have been proposed in the literature. One such study by Jeddi et al. (2021) presented a coordinated framework for multiple home energy management systems in residential neighborhoods. This framework allowed customers to collaborate and optimize energy consumption at the neighborhood level, thus avoiding operational issues at the grid level. The study employed the alternating direction method of multipliers technique to reduce computational burden and maintain customer privacy while implementing coordinated load scheduling in a distributed manner. Simulation results showed that the proposed approach was effective in maintaining nominal network conditions while benefiting individual customers and grid operators.

Shafiqullah et al. (2020) proposed a scenario-based energy management system for a local energy community using mixed-integer linear programming (MILP). The model generated scenarios with the Gaussian mixture model to consider uncertainties of demand and renewable sources, and Monte Carlo simulations were used to evaluate the ef-

fectiveness of the system. The study found that the stochastic process outperformed the deterministic process significantly in terms of cost, CO₂ emission, imported electricity from the grid, and the usage of local energy resources. The article emphasized the role of energy-neutral neighborhoods in achieving energy transition goals, but noted that uncertainties related to demand and renewable sources posed significant operational challenges for scheduling distributed energy resources.

Sidnell et al. (2021) employed a MILP model to optimize the design and operation of distributed energy resource systems in residential areas. The study found that distributed energy resource networks could reduce CO₂ emissions by 30-40% per household and be more economical than traditional energy consumption. The study also explored the use of feed-in tariffs, renewable heat incentives, and the ability to buy/sell from/to the national grid. The model was based on data from UK homes, but the approach could be applied to other regions where feed-in tariffs are popular renewable energy policy mechanisms.

Velik and Nicolay (2016) introduced a modified simulated annealing optimization approach to find optimal energy management strategies in grid-connected, storage-augmented, photovoltaics-supplied prosumer buildings and neighborhoods. The approach was compared to a gradient descent and a total state space search approach and found to be significantly more efficient and effective in finding better solutions.

The paper by Suresh et al. (2023) investigated how to address the economic dispatch problem of microgrids using traditional and newly introduced metaheuristic optimization algorithms. The study tested these algorithms on the IEEE 30 bus system and a microgrid facility at Wrocław University of Science and Technology. The results showed that the ant-colony based algorithm was the most suitable in terms of convergence time, solution value, and reliability. This algorithm was used to optimize economic dispatch in the microgrid by minimizing the levelized cost of energy. The authors suggest that decentralizing electrical networks through microgrids is a promising solution for achieving sustainability in energy production.

Another paper by Zucker et al. (2016) aimed to reduce CO₂ emissions by improving the thermal behavior of a large neighborhood of buildings using a co-simulation environment. They developed a three-step workflow to create building models for a large neighborhood and used the simula-

tion to optimize the operation of the heating plant with the goal of minimizing CO₂ emissions. The results showed that optimizing the indoor temperature controller for all buildings led to a reduction in CO₂ emissions.

Haider et al. (2022) developed a new approach for optimizing demand response in residential areas within smart grids. They used a multi-objective cost-peak optimization technique to balance cost savings and peak demand reduction and tested the approach on a residential area in Malaysia. The results showed significant improvements in cost savings and peak demand reduction compared to traditional demand response methods.

Benoit Durillon et al. (2020) developed a management system to reduce the neighborhood's peak load and load fluctuation while considering different types of load and consumer profiles. The study presented three different scenarios, and it was shown that all objectives could be fulfilled while increasing the mean consumer satisfaction by up to 13%. The study highlighted that involving consumers in the energy management system could lead to better outcomes for both consumers and the grid.

Green and Garimella (2022) investigated the use of data-driven black-box models in optimizing a single-home residential microgrid. The study found that data-driven black-box models have the potential to be used in place of grey-box models and showed the importance of demand-side management in residential energy consumption, particularly during peak hours.

Shakouri et al. (2017) proposed an intelligent energy management framework that aimed to minimize both electrical peak load and electricity cost simultaneously for a residential area with multiple households. The study concluded that the use of centralized energy management systems in residential areas could benefit both consumers and utility companies simultaneously.

Akter et al. (2020) presented an optimal energy management scheme for residential microgrids using distributed mixed integer linear programming problems. The proposed approach allowed houses to make optimal decisions without sharing private information with a central transactive energy management system. The study showed the efficacy of the presented method in distributedly optimizing energy resources in a neighborhood.

Fernandez et al. (2018) proposed a new demand-side management framework based on game theory to reduce peak

energy consumption in a Sydney neighborhood. This approach enabled energy sharing among neighbors using distributed and renewable energy resources, and included a real-time pricing model and an optimization algorithm based on Nash game theory to schedule energy consumption. The results of the case studies using real building consumption data showed that the proposed framework reduced peak average ratio and energy costs for consumers by 9.17% and 9.68% respectively during summer and winter.

Gholinejad et al. (2020) presented a hierarchical energy management system for multiple home energy hubs that aimed to maximize financial profit and reduce peak energy usage. The system managed energy generation, energy storage, and energy purchase/sale of each home energy hub using a heuristic bidding strategy based on a weighted distribution of excess power among consumers. The simulator developed in MATLAB/GUI showed that the system decreased total energy cost and increased total profit.

Hu et al. (2021) and Thirunavukkarasu et al. (2022) provided useful reviews on different approaches and techniques for managing energy in residential neighborhoods, including coordination and negotiation techniques, optimization techniques, and microgrid energy management systems.

There is another group of studies dealing with local trading topic for residential neighborhoods. Singh et al. (2022) proposed a peer-matching mechanism called enTrade for designing a P2P energy trading market model between prosumers and consumers in a distributed electricity market using a game theory-based leader-follower model. Fernandez et al. (2021) proposed a community energy management system for a smart locality that facilitates local energy trading between consumers with renewable energy units, a central storage facility, and the power grid. Finally, Görgülü et al. (2022) examined the role of P2P energy trading in system operation and performed an economic analysis using a mathematical modeling approach based on MILP.

There are also further studies on decision making mechanisms for the cases in which the residential end-users can participate in local energy markets. Some review studies in this manner can be found the study of Bukar et al. (2023) to analyze different approaches applied in several literature studies.

In this context, this study proposes a new operation strategy that enables transactions of flexibility among households in a residential neighborhood with inverter-based air conditioner loads. The proposed strategy is cost minimization

oriented and aims to optimize the energy consumption and production patterns of households to minimize the overall cost per household. The proposed strategy incorporates a load limit provided by the grid operator for the overall neighborhood during certain periods, and the neighborhood operator adjusts this limit equally for all households. The households that consume below the imposed limit can sell their unused energy to other households that cannot obey their power production limits. A penalty is imposed on households that exceed their allotted limit even after purchasing additional energy from other households. The proposed operation strategy utilizes a MILP optimization model that incorporates constraints such as energy balance, load limit, and flexibility procurement and selling limits to ensure the overall cost is minimized while the energy consumption and production patterns are optimized.

The contributions of this study are as follows:

- Development of a novel energy management strategy for residential neighborhoods that facilitates cost-effective flexibility transactions between households, aiming to minimize the overall cost per household and optimize energy consumption and production patterns.
- Formulation of a MILP optimization model that incorporates a flexibility-based energy trading platform, enabling peer-to-peer energy transactions and incentivizing households to optimize their energy use, thus supporting the transition to a low-carbon energy system.
- Comprehensive evaluation of the proposed concept through five different case studies, assessing the impact of varying peak power limits on a residential neighborhood during peak demand hours. The results demonstrated the effectiveness of the proposed strategy in significantly reducing the overall cost per household and provided insights into the consequences of stricter grid constraints on energy consumption and costs.
- Identification of the need for additional flexible resources in residential neighborhoods, particularly under more stringent grid constraints, highlighting potential areas for further research and development in residential energy management.

The remainder of the paper is organized as follows: The mathematical background regarding the flexibility transactions oriented residential neighborhood energy management strategy is depicted in Section 2. Afterwards, the obtained results based on case studies are given in Section 3. Finally, the concluding remarks are presented in Section 4.

2. Methodology

This study proposes a new strategy for exchanging flexibility between households in a residential neighborhood, which optimizes the energy consumption and production patterns of each household to minimize overall costs. The strategy aims to reduce costs by allowing households that consume less than their allotted limit to sell their unused energy to other households that need it. The neighborhood operator sets a load limit for the overall neighborhood during certain periods, which is then distributed equally among households. A penalty is imposed on households that exceed their allotted limit, even if they purchase additional energy from other households. The strategy utilizes a mathematical optimization model to ensure that energy consumption and production patterns are optimized while minimizing costs, and considers constraints such as energy balance, load limit, and flexibility procurement and selling limits.

The objective of the proposed concept is to minimize the average cost among the residential end-users existing in the neighborhood as given in (1). Here, the individual cost of each end-user consists of an energy procurement cost, a flexibility procurement cost, a flexibility selling based benefit and a penalty cost related to the case when this end-user cannot satisfy the imposed peak load limit even after procuring the available flexible power from the neighborhood pool as shown in (2).

$$MinCost_{Av} = \frac{\sum_h Cost_h}{card(h)} \quad (1)$$

$$Cost_h = \sum_t P_{grid,h,t} \cdot \Delta T \cdot \gamma_{energ,t} + P_{flex-buy,h,t} \cdot \Delta T \cdot \gamma_{flex,t} + P_{penalty,h,t} \cdot \Delta T \cdot \gamma_{penalty} - P_{flex-sell,h,t} \cdot \Delta T \cdot \gamma_{flex,t}, \forall h \quad (2)$$

As given in (2), the power drawn from the grid by each household corresponds to the supply of flexible load together with the air conditioner load demand in each time period. Here, the grid operator may impose a varying peak power demand to the overall neighborhood and the neighborhood energy management unit fairly allocates this limit to each residential end-users as formulated in (4). For each household, when this maximum demand is greater than the real power demand of this household, there is a chance for this household to benefit from this gap by selling this power difference to other residential end-users in the neighborhood. On the contrary, the household can procure such a flexibility from other households when its demand is higher than the maximum allocated demand level to prevent being penal-

ized by a higher cost corresponding to a penalization power value at the worst case. By this chance depicted in (5), the general scheme allows a platform for the end-users to trade their demand-based flexibility locally as a new contribution to the relevant literature.

$$P_{grid,h,t} = P_{load-inflex,h,t} + P_{AC,h,t}, \forall h, t \quad (3)$$

$$P_{grid-max,h,t} = \frac{P_{grid-lim,t}}{card(h)}, \forall h, t \quad (4)$$

$$P_{grid-max,h,t} = P_{grid,h,t} + P_{flex-sell-max,h,t} - P_{flex-buy,h,t} - P_{penalty,h,t}, \forall h, t \quad (5)$$

The simultaneous occurrence for the allowance of flexibility selling, buying and penalizing axioms is prevented using the logical constraints given in (6)–(8). As given in (9), the selling levels of each household is restricted by the maximum allowed level formerly determined in (5). Finally, the local balance for the overall selling and buying decisions is determined in (10) ensuring that the buying action can only be possible when there is a flexible power selling possibility for another end-user and vice versa.

$$P_{flex-sell-max,h,t} \leq N \cdot u_{1,h,t}, \forall h, t \quad (6)$$

$$P_{flex-buy,h,t} \leq N \cdot (1 - u_{1,h,t}), \forall h, t \quad (7)$$

$$P_{penalty,h,t} \leq N \cdot (1 - u_{1,h,t}), \forall h, t \quad (8)$$

$$P_{flex-sell,h,t} \leq P_{flex-sell-max,h,t}, \forall h, t \quad (9)$$

$$\sum_h P_{flex-sell,h,t} = \sum_h P_{flex-buy,h,t}, \forall t \quad (10)$$

The ON/OFF type air conditioners are modeled to be either in zero or nominal power consumption state while the power consumption of an inverter air conditioner can fully vary between a minimum and maximum level if the air conditioner is ON as depicted in (11). The relevant indoor temperature variation regarding the air conditioner power consumption, ambient temperature as well as the air conditioner and household specifications is modeled in (12) using equivalent thermal parameter approach (Mathieu et al., 2013). The details of parameter a is given in (13) regarding the thermal resistance and capacitance parameters. The initialization of indoor temperature variation is realized by (14). The indoor temperature should be maintained within a dead-band limit around the temperature set point as given in (15) while this set point can only be changed by the energy management system within desired upper and lower bounds as ensured by (16).

$$u_{2,h,t} \cdot P_{AC-min,h} \leq P_{AC,h,t} \leq u_{2,h,t} \cdot P_{AC-max,h}, \forall h, t \quad (11)$$

$$T_{in,h,t} = a \cdot T_{in,h,t-1} + (1 - a) \cdot [T_{out,t-1} - COP \cdot R \cdot P_{AC,h,t-1}], \forall h, t > 1 \quad (12)$$

$$a = e^{-\frac{\Delta T}{R \cdot C}} \quad (13)$$

$$T_{in,h,t} = T_{in-init,h}, \forall h, \text{ if } t = 1 \quad (14)$$

$$T_{set,h,t} - T_{db} \leq T_{in,h,t} \leq T_{set,h,t} + T_{db}, \forall h, t \quad (15)$$

$$T_{lim-down,h} \leq T_{set,h,t} \leq T_{lim-up,h}, \forall h, t \quad (16)$$

3. Test and Results

The problem of the cost minimization oriented energy management strategy considering usage fairness is formulated through MILP approach. The proposed structure is tested with the GAMS v.24.1.3 software and CPLEX v.12 solver. The simulation takes less than 1 second for a horizon on a computer with Intel 7 processor and 8 GB RAM.

A residential neighbourhood of 20 households is considered in this study. The relevant data are gathered using Domestic Electricity Demand Model of CREST (Centre for Renewable Energy Systems Technology) from Loughborough University. Randomized appliance allocation and occupancy variation are implemented to obtain the data of the mentioned 20 households including 2 end-users with 1 occupants, 3 end-users with 2 occupants, 4 end-users with 3 occupants, 5 end-users with 4 occupants and 6 end-users with 5 occupants. The sample power profiles of 4 different households are depicted in Figure 1. It should here be noted that “r” in the mentioned figures represents the relevant residential end-user, e.g. r20 represents residential end-user 20.

On the other hand, the outdoor temperature variation is presented in Figure 2. Moreover, the price variation considered in this study is depicted in Figure 3. It should be mentioned here that the flexibility transaction prices are 20% higher than that of the energy price in each period to reward the end-users with flexibility selling possibility regarding their lower consumption while simultaneously penalizing the end-users with flexibility buying requirement regarding their higher consumption. It should here be noted that the flat penalty cost is considered as 3 Euro/kWh. Apart from these, identical households with a thermal resistance of 2 °C/kW, a COP of 2.5, air conditioner minimum and maximum power of 0.2 and 3.5 kW, thermal capacitance of 2 kWh/°C, an initial indoor temperature of 20 °C, a temperature dead-band of 0.5 °C, and a lower and upper temperature set-point definition limit of 18 and 22 °C are considered.

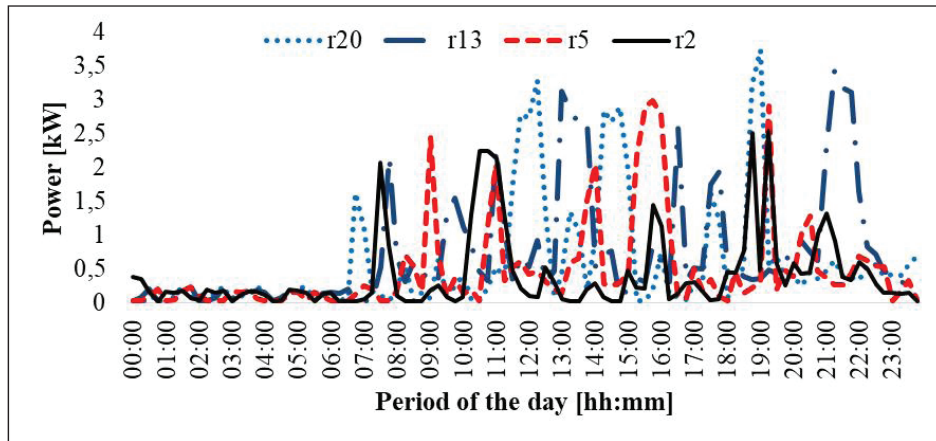


Figure 1. The power consumption of sample end-users.

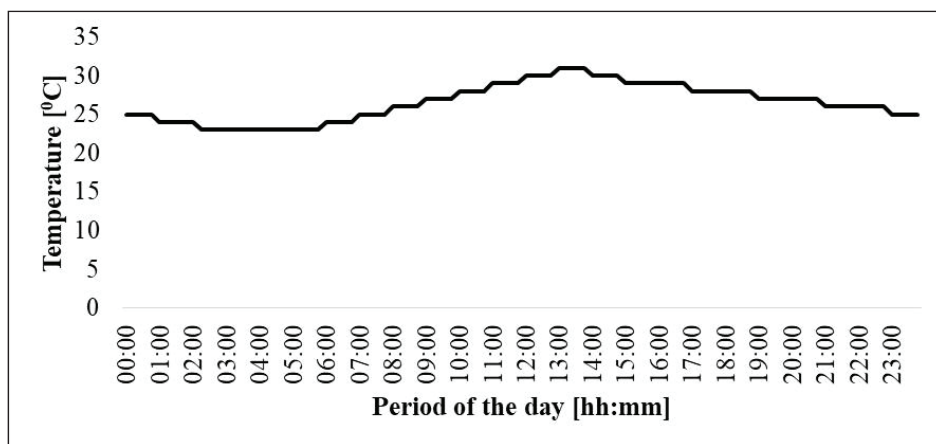


Figure 2. Outdoor temperature variation.

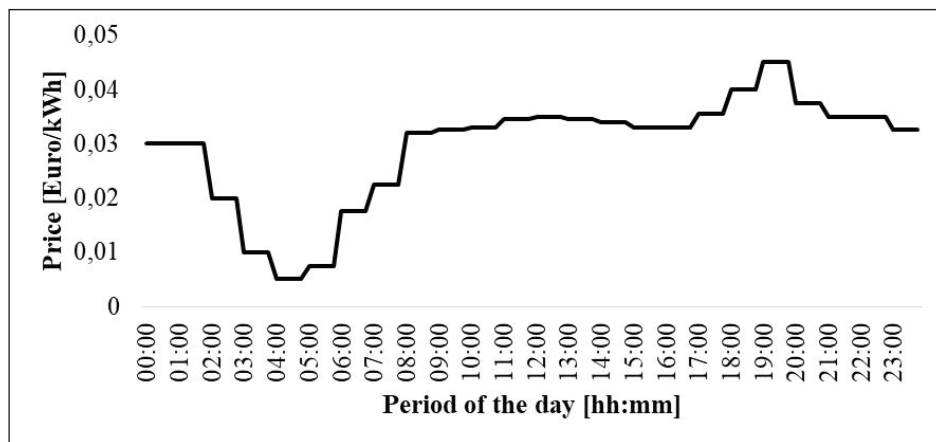


Figure 3. Energy price variation.

To assess the proposed concept, five different case studies are considered regarding the total peak power limit employed to the residential neighborhood at peak demand hours between 19:00–22:00 for a transformer limit of 100kW:

Case-1: No peak power limit

Case-2: A total peak power limit corresponding to the 80% of the transformer capacity is imposed between 19:00–22:00

Case-3: A total peak power limit corresponding to the 60% of the transformer capacity is imposed between 19:00–22:00

Case-4: A total peak power limit corresponding to the 40% of the transformer capacity is imposed between 19:00–22:00

Case-5: A total peak power limit corresponding to the 20% of the transformer capacity is imposed between 19:00–22:00

The results regarding Case-1 and Case-5 are shown below in Figures 4-9 to depict the impact of peak power limit at two edge cases. The grid power variation is initially shown in Figures 4 and 5 respectively for Case-1 and Case-5. As can be seen, the initial periods are generally similar while a vital difference occurs especially before the peak power limit period to avoid any possible penalty payment condition. By this pre-consumption action before the peak power limitation period, the considered households do not exceed the average power limit for Case-1 and Case-5 corresponding

respectively to 5 kW and 1 kW per household. However, the peak power each household faces increases within the whole day with the implementation of harder peak power limits especially for r20, leading to a lower load factor which should also be reconsidered with further actions. This difference between different cases is mainly related to the change of air conditioner power consumption comparatively shown in Figures 6 and 7. Here, as the households and other conditions are considered identical, the air conditioner power consumption and the corresponding indoor temperature

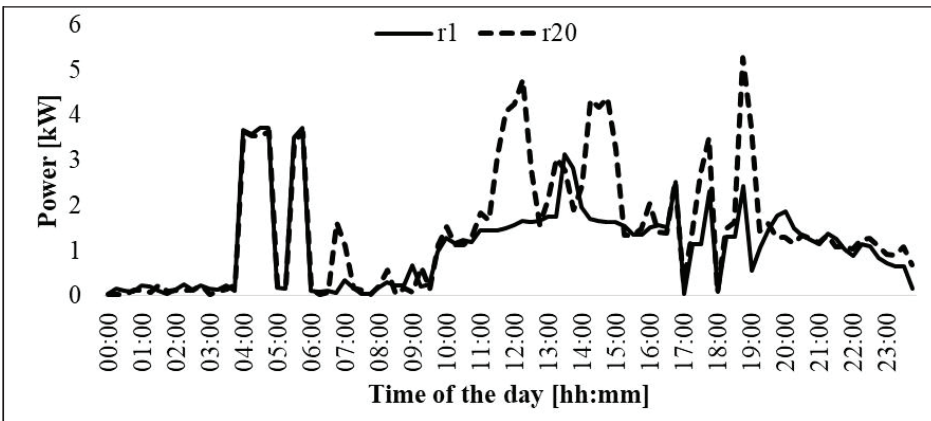


Figure 4. Grid power variation for Case-1.

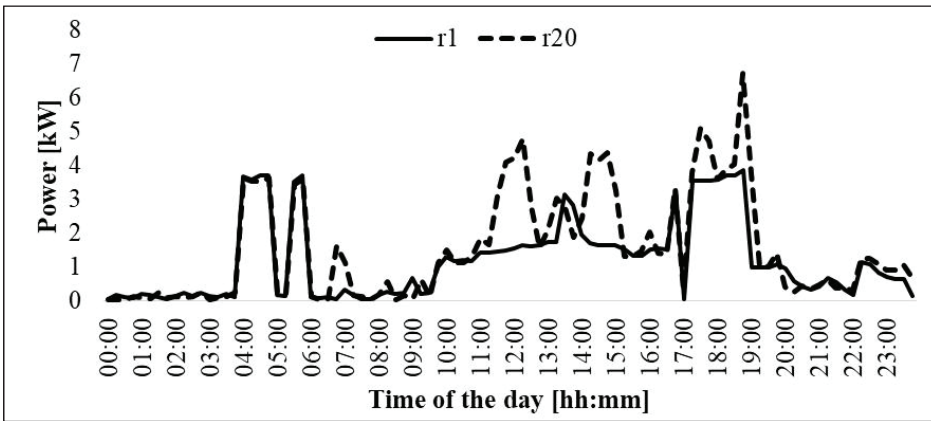


Figure 5. Grid power variation for Case-5.

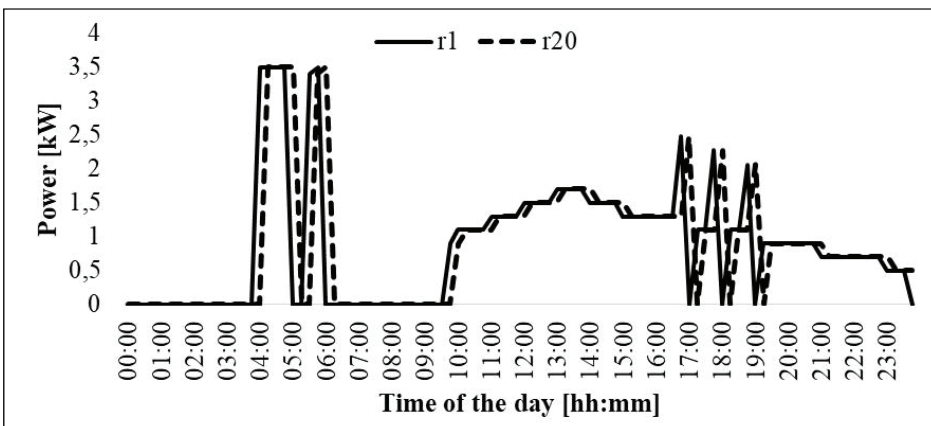


Figure 6. Air conditioner power variation for Case-1.

(shown in Figures 8 and 9) are nearly the same between different households, but differs between different cases.

The overall results are summarized in Table 1 for all cases. As seen, when a penalty condition is not faced, the average cost is nearly the same in Cases 1-4 clearly depicting how the penalty conditions are aimed to be avoided as much as possible. However, even the average cost is maintained, the minimum cost among the end-users decreases (reaching

10%) while the maximum cost increases (around 4%) when harder limits are imposed from Case-1 to Case-4. Finally, Case-5 is the only case when a penalty cost is imposed to some of the households as there is not sufficient flexibility in the overall neighborhood. This leads to the neighborhood to exceed the imposed overall demand limit as seen in Figure 10 specifically for peak demand periods. This depicts that more flexible resources are needed for such a neighborhood under harder grid constraints.

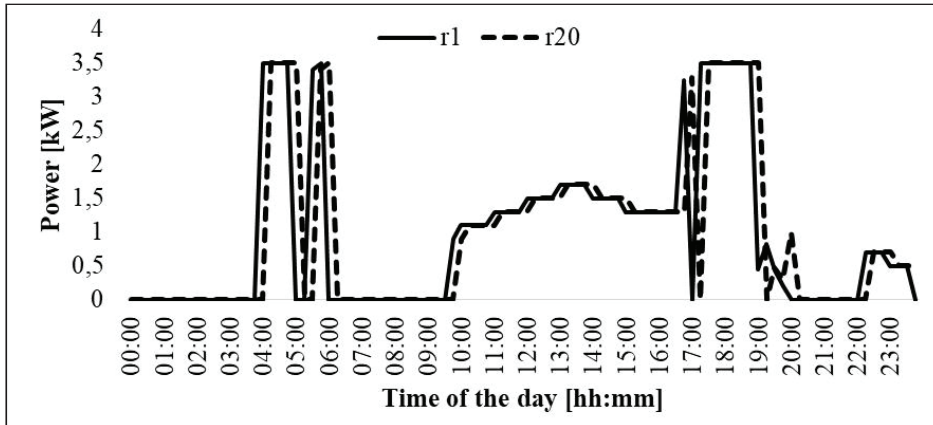


Figure 7. Air conditioner power variation for Case-5.

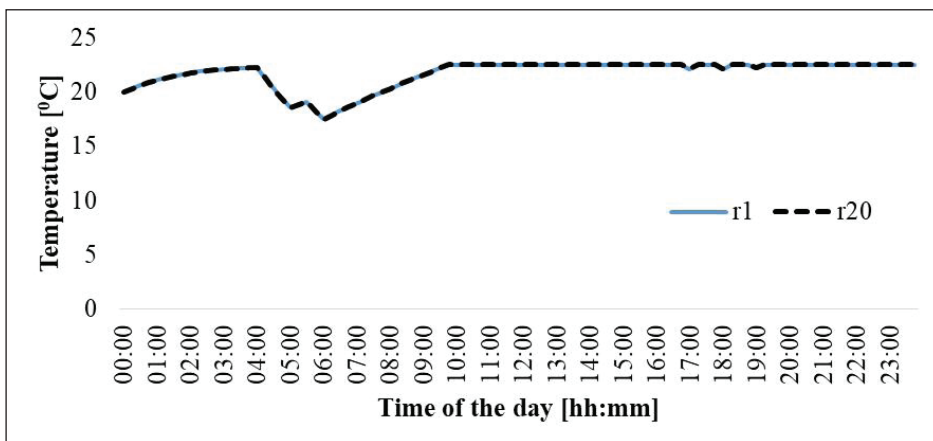


Figure 8. Indoor temperature variation for Case-1.

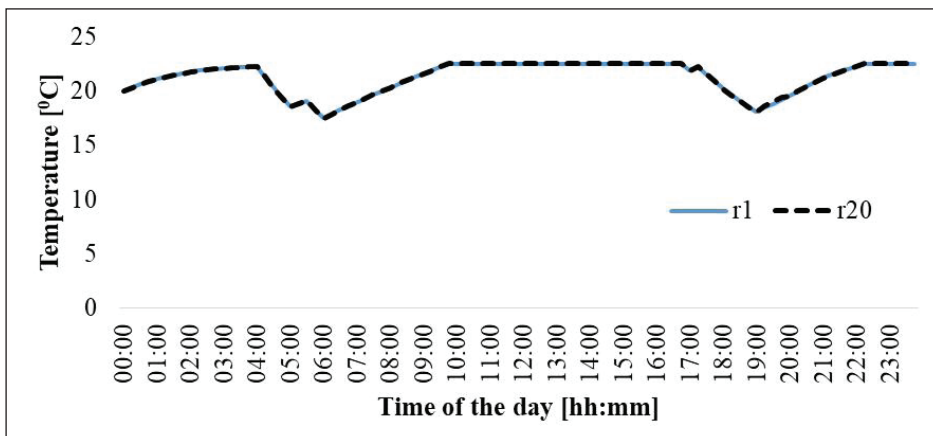
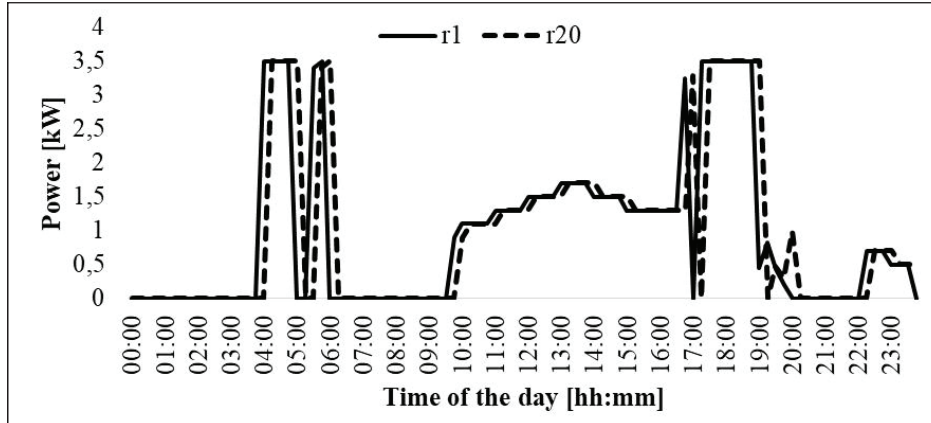


Figure 9. Indoor temperature variation for Case-5.

Table 1. Comparative analysis of the results of different cases.

Case	Min. cost [Euro]	Max. cost [Euro]	Av. Cost [Euro]	Total. flex. [kW]	Total pen. [kW]
Case-1	0.7675	1.1501	0.9543	4.107	0
Case-2	0.7675	1.1506	0.9543	6.844	0
Case-3	0.7526	1.1797	0.9543	29.133	0
Case-4	0.6893	1.2037	0.9550	69.604	0
Case-5	0.7886	5.5164	1.6491	98.003	16.37

**Figure 10.** Total neighborhood power demand for Case-5 during peak power limit periods.

4. Conclusions

In this study, a novel energy management strategy for residential neighborhoods was introduced, enabling cost-effective flexibility transactions among households. The MILP optimization model aimed to minimize the overall cost per household while optimizing energy consumption and production patterns of households with inverter-based air conditioner loads. The approach incorporated a flexibility-based energy trading platform that facilitated peer-to-peer energy transactions, encouraging households to optimize their energy use and support the transition to a low-carbon energy system.

The effectiveness of the proposed concept was assessed through five different case studies that examined the impact of peak power limits on a residential neighborhood during peak demand hours between 7-10 PM for a transformer limit of 100kW. The cases ranged from no peak power limit to peak power limits constituting 20% to 80% of the transformer capacity during peak hours. The results from Cases 1 and 5 were presented, illustrating the impact of peak power limits at the two extremes.

The grid power variation was initially similar in both cases; however, a notable difference occurred before the peak pow-

er limit period, as households adjusted their consumption to avoid possible penalty payments. This pre-consumption action ensured that households did not exceed the average power limit in both cases. Nonetheless, implementing stricter peak power limits increased peak power throughout the day, resulting in a lower load factor that requires further consideration.

The difference between the cases was primarily associated with changes in air conditioner power consumption. The overall results indicated that when penalty conditions were not faced, the average cost remained nearly constant for Cases 1-4, highlighting that the strategy aimed to avoid penalty conditions as much as possible. However, as stricter limits were imposed from Case 1 to Case 4, the minimum cost among end-users decreased, while the maximum cost increased. Case 5 was the only scenario where a penalty cost was imposed on some households, suggesting that additional flexible resources are necessary for neighborhoods under more stringent grid constraints.

The MILP-based optimization model's results demonstrated the proposed strategy's effectiveness in significantly reducing the overall cost per household, indicating its potential for broader applicability in various residential neighborhoods. In summary, this energy management strategy

presents a promising approach for creating a more efficient and cost-effective energy system in residential neighborhoods, laying the groundwork for further research and development in this field. As future work, it would be valuable to consider additional flexible resources and explore the integration of renewable energy sources, storage systems, and demand response programs to further optimize the energy management and enhance grid resilience.

5. Nomenclature

Sets

h Set of residential end-user.
 t Set of time periods.

Parameters

C Thermal capacitance [kWh/ $^{\circ}$ C].
 COP Air conditioner coefficient of performance.
 N Sufficiently large positive constant.
 $P_{AC-max,h}$ Maximum power rating of air conditioner of residential end-user h [kW].
 $P_{AC-min,h}$ Minimum power rating of air conditioner of residential end-user h [kW].
 $P_{grid-lim,t}$ Maximum allowed total power limit for residential neighborhood in period t [kW].
 $P_{grid-max,h,t}$ Maximum allowed power limit for residential end-user h in period t [kW].
 $P_{load-inflex,h,t}$ Inflexible power demand of residential end-user h in period t [kW].
 R Thermal resistance [$^{\circ}$ C/kW].
 T_{db} Temperature deviation in dead-band operation of an air conditioner [$^{\circ}$ C].
 $T_{in-init,h}$ Initial indoor temperature of residential end-user h [$^{\circ}$ C].

$T_{lim-down,h}$ Lower limit of thermostat set-point decision [$^{\circ}$ C].
 $T_{lim-up,h}$ Upper limit of thermostat set-point decision [$^{\circ}$ C].
 $T_{out,t}$ Outdoor temperature in period t [$^{\circ}$ C].
 $\gamma_{energy,t}$ Energy price in period t [Euro/kWh].
 $\gamma_{flex,t}$ Flexible transaction price in period t [Euro/kWh].
 $\gamma_{penalty}$ Penalty price in period t [Euro/kWh].
 ΔT Time granularity [h].

Variables

$P_{AC,h,t}$ Air conditioner power demand of residential end-user h in period t [kW].
 $P_{flex-buy,h,t}$ Flexible power bought by residential end-user h in period t [kW].
 $P_{flex-sell,h,t}$ Flexible power sold by residential end-user h in period t [kW].
 $P_{flex-sell-max,h,t}$ Maximum flexible power that can be sold by residential end-user h in period t [kW].
 $P_{grid,h,t}$ Grid power of residential end-user h in period t [kW].
 $P_{penalty,h,t}$ Penalized power consumption of residential end-user h in period t [kW].
 $T_{in,h,t}$ Indoor temperature of residential end-user h in period t [$^{\circ}$ C].
 $T_{set,h,t}$ Thermostat set-point temperature of residential end-user h in period t [$^{\circ}$ C].
 $u_{1,h,t}, u_{2,h,t}$ Binary variables.

6. References

- Akter, M.N., Mahmud, M.A., Haque, M.E., Oo, A.M.T. 2020.** An optimal distributed energy management scheme for solving transactive energy sharing problems in residential microgrids. *Applied Energy*, 270: 115133. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115133
- Bukar, A.L., Hamza, M.F., Ayub, S., Abobaker, A.K., Modu, B., Mohseni, S., Brent, A.C., Ogbonnaya, C., Mustapha, K., Idakwo, H.O. 2023.** Peer-to-peer electricity trading: A systematic review on current developments and perspectives. *Renewable Energy Focus*, 44: 317-333. DOI: 10.1016/j.ref.2023.01.008
- Durillon, B., Davigny, A., Kazmierczak, S., Barry, H., Saudemont, C., Robyns, B. 2020.** Decentralized neighbourhood energy management considering residential profiles and welfare for grid load smoothing. *Sustainable Cities and Society*, 63: 102464. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102464
- Fernandez, E., Hossain, M.J., Mahmud, K., Nizami, M.S.H., Kashif, M. 2021.** A bi-level optimization-based community energy management system for optimal energy sharing and trading among peers. *Journal of Cleaner Production*, 279: 123254. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123254
- Fernandez, E., Hossain, M.J., Nizami, M.S.H. 2018.** Game-theoretic approach to demand-side energy management for a smart neighbourhood in Sydney incorporating renewable resources. *Applied Energy*, 232: 245-257. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.171
- Gholinejad, H.R., Adabi, J., Marzband, M. 2021.** An energy management system structure for Neighborhood Networks. *Journal of Building Engineering*, 41: 102376. DOI: 10.1016/j.job.2021.102376
- Gholinejad, H.R., Loni, A., Adabi, J., Marzband, M. 2020.** A hierarchical energy management system for multiple home energy hubs in neighborhood grids. *Journal of Building Engineering*, 28: 101028. DOI: 10.1016/j.job.2019.101028
- Görgülü, H., Topçuoğlu, Y., Yıldız, A., Gökçek, T., Ateş, Y., Erdiņç, O. 2022.** Peer-to-peer energy trading among smart homes considering responsive demand and interactive visual interface for monitoring. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 29: 100584. DOI: 10.1016/j.segan.2021.100584
- Green, C., Garimella, S. 2021.** Residential microgrid optimization using grey-box and black-box modeling methods. *Energy and Buildings*, 235: 110705. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110705
- Haider, H.T, Muhsen, D.H., Al-Nidawi, Y.M, Khatib, T., Sec, O.H. 2022.** A novel approach for multi-objective cost-peak optimization for demand response of a residential area in smart grids. *Energy*, 254: 124360. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124360
- Hu, M., Xiao, F., Wang, S. 2021.** Neighborhood-level coordination and negotiation techniques for managing demand-side flexibility in residential microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135: 110248. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110248
- Jeddi, B., Mishra, Y., Ledwich, G. 2021.** Distributed load scheduling in residential neighborhoods for coordinated operation of multiple home energy management systems. *Applied Energy*, 300: 117353. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117353
- Mathieu, J.L., Koch, S., Callaway, D. S. 2013.** State estimation and control of electric loads to manage real-time energy imbalance, *IEEE Transactions on Power Systems*, 28: 430-440. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2204074
- Nematchoua, M.K., Nishimwe, A.M.-R., Reiter, S. 2021.** Towards nearly zero-energy residential neighbourhoods in the European Union: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135: 110198. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110198
- Shafiullah, D.S., Vergara, P.P., Haque, A.N.M.M., Nguyen, P.H., Pemen A.J.M. 2020.** Gaussian Mixture Based Uncertainty Modeling to Optimize Energy Management of Heterogeneous Building Neighborhoods: A Case Study of a Dutch University Medical Campus. *Energy and Buildings*, 224: 110150. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110150
- Shakouri, H., Kazemi, A. 2017.** Multi-objective cost-load optimization for demand side management of a residential area in smart grids. *Sustainable Cities and Society*, 32: 171-180. DOI: 10.1016/j.scs.2017.03.018
- Sidnell, T., Clarke, F., Dorneanu, B., Mechleri, E., Arellano-Garcia, H. 2021.** Optimal design and operation of distributed energy resources systems for residential neighbourhoods. *Smart Energy*, 4: 100049. DOI: 10.1016/j.segy.2021.100049
- Singh, K., Gadh, R., Singh, A., Dewangan, C.L. 2022.** Design of an optimal P2P energy trading market model using bilevel stochastic optimization. *Applied Energy*, 328: 120193. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120193
- Suresh, V., Janik, P., Jasinski, M., Guerrero, J.M., Leonowicz, Z. 2023.** Microgrid energy management using metaheuristic optimization algorithms. *Applied Soft Computing*, 134: 109981. DOI: 10.1016/j.asoc.2022.109981
- Thirunavukkarasu, G.S., Seyedmahmoudian, M., Jamei, E., Horan, B., Mekhilef, S., Stojcevski, A. 2022.** Role of optimization techniques in microgrid energy management systems—A review. *Energy Strategy Reviews*, 43:100899. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100899
- Velik, R., Nicolay, P. 2016.** Energy management in storage-augmented, grid-connected prosumer buildings and neighborhoods using a modified simulated annealing optimization. *Computers & Operations Research*, 66: 248-257. DOI: 10.1016/j.cor.2015.03.002

Wu, Y., Wu, Y., Cimen, H., Vasquez, J. C., Guerrero, J.M.

2022. Towards collective energy Community: Potential roles of microgrid and blockchain to go beyond P2P energy trading. *Applied Energy*, 314: 119003. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119003

Zucker, G., Judex, F., Blöchle, M., Köstl, M., Widl, E., Hauer,

S., Bres, A., Zeilinger, J. 2016. A new method for optimizing operation of large neighborhoods of buildings using thermal simulation. *Energy and Buildings*, 125: 153-160. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.081



Antikanser Etkili Doğal Bir Bileşik: Bakteriye Ekzopolisakkaritler

A Natural Compound with Anti-Cancer Effect: Bacterial Exopolysaccharides

Volkan Kuzucu* , Nazime Mercan Dogan 

Pamukkale Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Denizli, Türkiye

Öz

Bakteriyel ekzopolisakkaritler (EPS'ler), birçok bakteri tarafından sentezlenen biyomoleküller olup çevresel koruma, yüzey yapışması ve hücrel etkileşimler gibi çeşitli biyolojik işlevlere sahiptir. Güçlü biyouyumlu özellikleri, onları çeşitli uygulamalara uygun hale getirmektedir. Kanser, dünyadaki en büyük hastalık yüklerinden biridir, bu nedenle kanser için yeni kemoterapötik etkili ajanlar ve tedaviler geliştirmek için çok sayıda bilimsel çalışma yürütülmektedir. Literatür bilgileri, EPS'lerin kanser hücrelerinin çoğalmasını, anjiyogenezisini ve metastazını engelleyebileceğini ve apoptozu uyarabileceğini göstermektedir. EPS'lerin meme, kolon, akciğer ve mide kanserine etkileri bilimsel çalışmalarla kanıtlanmıştır. Bu derleme, bakteriyel EPS'lerin antikanser özelliğini kısaca özetlemekte ve kemoterapi ve radyoterapinin yan etkilerini azaltabilecek bir ajan olarak potansiyel faydalarını vurgulayarak açıklamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Antikanser etki, Bakteri, Ekzopolisakkarit

Abstract

Bacterial exopolysaccharides (EPSs) are biomolecules synthesized by many bacteria and have a variety of biological functions such as environmental protection, surface adhesion, and cellular interactions. Their strong biocompatible properties make them suitable for a variety of applications. As it is known, the disease burden of cancer is enormous both in terms of health and economy, therefore numerous studies are being conducted to develop new chemotherapeutic agents and treatments for cancer by researchers. Literature information indicates that EPSs can inhibit proliferation, angiogenesis and metastasis of cancer cells and stimulate apoptosis. The effects of EPS on breast, colon, lung and stomach cancer have been proven by scientific studies. This review briefly summarizes the anticancer properties of bacterial EPSs and highlights their potential benefits as an agent that can reduce the side effects of chemotherapy and radiotherapy.

Keywords: Anticancer effect, Bacteria, Exopolysaccharide


1. Giriş

Kanser, genlerimizde kodlanmış olan hücre bölünmesi evrelerindeki kontrol mekanizmalarının bozulmasıyla oluşur. Bir hücreden başlayarak gerçekleşen bu kontrolsüz bölünmeyle birlikte hücre sayısı katlanarak artar ve bu kontrolsüz büyüme ile birlikte doku ve organlarda büyük kitleler oluşur. Oluşan kitleler bulunduğu organların hücreler arası iletişimini keserek işlevlerini kaybetmelerine neden olur. Günümüzde kanser, en yaygın ve tehlikeli hastalıkların ba-

şında gelir. Kanser ile mücadelede sıklıkla cerrahi müdahale, kemoterapi ve radyoterapi gibi tedavi yöntemleri uygulanır. Ancak bu yöntemler, birçok kanser türünün büyümesini ve yayılmasını engelleyemez. Ayrıca tedavide kullanılan bu yöntemlerin hastayı fiziksel ve psikolojik olarak zor durumda bırakan çok fazla yan etkisi de vardır (Erejuwa vd. 2014).

Tedavi yöntemlerindeki başarı oranının düşük olması ve kanser hastalarının yaşadığı zorluklar göz önünde bulundurulduğunda alternatif tedavi yöntemleri üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar önem kazanmaktadır. Bu noktada mikrobiyal dünyanın kanserle savaşta etkisi dikkat çekicidir. Özellikle mikrobiyal ekzopolisakkaritlerin kanserli hücreler üzerindeki güçlü inhibe edici etkileri, günümüzde birçok araştırmacıyı bu ürünlere yönlendirmiştir (Wong vd. 2007; Ramamoorthy vd. 2018).

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: volkankuzucu98@gmail.com

Volkan Kuzucu  orcid.org/0000-0002-6815-2102

Nazime Mercan Dogan  orcid.org/0000-0001-8590-8381



Mikrobiyal ekzopolisakkarit (EPS), mikroorganizmalar tarafından üretilen ve salgılanan hücre dışı polimerik maddelerdir ve fiziksel durumları, kimyasal özellikleri ve hücrelere yönelik işlevsel rolleri açısından farklılık gösterir. Mikroorganizmaların ürettiği bu polisakkarit yapılar çoğunlukla bir biyofilm ile bağlantılı olarak üretilir ve bu yapı içindeki mikroorganizmaları kimyasal ve fiziksel faktörlere karşı korur (Solmaz vd. 2018). Bitki, hayvan ve mikroorganizmalardan elde edilen çok sayıda doğal sekonder metabolitler gibi EPS'ler de birçok biyolojik ve farmakolojik özelliğe sahiptir ve sentetik moleküllere kıyasla daha az yan etkileri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. EPS'lerin asetil, fosforil veya benzil grubu gibi değerli biyolojik aktif moleküller içeriyor olması onların antioksidan ve antitümör etkilerini önemli ölçüde arttırmaktadır (Liu vd. 2012; Abdel-Fattah vd. 2012; Ramamoorthy vd. 2018).

Bu derlemede, mikrobiyal ekzopolisakkaritlerin (EPS) bir anti-kanser ajanı olarak kullanılabilirliği ve sağlık üzerindeki olumlu etkileri hakkında daha fazla bilgilendirme amaçlanmıştır.

2. Mikrobiyal Ekzopolisakkaritler (EPS) Nedir?

Polisakkaritler, doğada en fazla bulunan organik makromoleküller olup prokaryotik, ökaryotik hücreler ve bitkiler gibi çok çeşitli organizmalar tarafından sentezlenir. Mikrobiyal kaynaklı polisakkaritlerin geniş yelpazede bilinen eşsiz biyolojik etkileri, onları bilimsel alanda önemli kılmaktadır. Polisakkaritlerin en yaygın tipi olan bakteriyel ekzopolisakkaritler (EPS), hücre-çevre etkileşimde de önemli rol oynar (Houari vd. 2008). Mikrobiyal yaşam için temel oluşturan EPS, kimyasal reaksiyonlar, tuzluluk, kuraklık gibi çevresel streslere karşı organizmayı korur. Organizma için ideal ortam şartlarını sağlaması EPS'nin yüksek biyoyoumluluk özelliğinden kaynaklanır (Costa vd. 2018). Örneğin, bakteriyel EPS'ler birbirleriyle etkileşime girerek mikrobiyal hücreleri saran bir matriks oluşturur ve ki bu yapı biyofilm tabakasının temelidir (Payne ve Boles 2016). Bu matriksin stabilitesi, zayıf fizikokimyasal kuvvetler içeren EPS'ler arasındaki iyonik bağlanma ile sağlanır. Bakteriyel agregatlarla etkileşime giren EPS ağı, yapıya kohezyon ve viskoelastisite kazandırır. Bu sayede yapı akışkan ve jelimsi hale dönüşür (Shaw vd. 2004). EPS biyosentezi fazla enerji kullanımına ihtiyaç duyduğu için üretici mikroorganizmalara bir tür avantaj sağlaması gerekir. Organizmanın enerjisinin çoğunu feda ettiği bu bileşenlerin neden sentezlendiği ve bu organik polimerlerin organizmaya kazandırdığı avantajlar, bilim insanlarının merak ettiği konulardır. Bu nedenle EPS üreti-

mi ve fonksiyonları bilim insanları tarafından uzun süreli çalışılmaktadır. Bu polimerlerin bileşimi, yapısı ve bu yapıyı oluşturan birimlerin düzeni, mikroorganizma türlerine göre farklılık gösterdiği gibi her bir farklı EPS de türler arasında farklı yapı ve fonksiyonlara sahiptir (Flemming ve Wingender 2010; Roca vd. 2015).

EPS üreten organizmaların birçoğu, karbon ve enerji kaynağı olarak karbonhidratı, azot kaynağı olarak bir amonyum tuzu veya amino asidi kullanır ve enerjinin çoğu EPS üretimi için harcanır (Manca de Nadra vd. 1985; Cerning 1990; Mozzi vd. 1995). Çoğu EPS, sabit bir şekli olmayan rastgele sarmallardan oluşur ve rastgele dalgalanan üçüncül yapıya sahiptirler. Genellikle de jelimsi bir yapıda olan polimerin viskozite kabiliyeti; içsel viskozite, dağılmış partikülün kapladığı spesifik hacim ve polimer konsantrasyonuna bağlıdır (Tuinier vd. 1999). EPS, yapışkan bir dokuya ve iyonik yüklerle sahip olduğundan özellikle katı parçacıkları birleştirici özelliği sayesinde yapısal mukavemeti korumada da etkilidir (Chenu 1995). Ayrıca difüzyonu azaltarak, bakteri ve bitki savunma bileşikleri arasında mekanik bir bariyer görevi görür. Bu sayede mikroorganizmanın bitki savunma bileşiklerine karşı korunmasını sağlar. Örneğin, *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* (Burkholder 1926) ve *Sinorhizobium* (Ensifer) *meliloti* (Currier ve Strobel 1976) bakterileri, enfeksiyon sırasında konakçı bitki tarafından üretilen reaktif oksijen türlerine (ROS) karşı EPS'si sayesinde korunur ve oksidatif stresi azaltır (Király vd. 1997; Lehman ve Long 2013). EPS üretimi, kuraklık stresi altındaki ortamlarda mikroorganizmalara avantaj sağlar. Çünkü EPS, ağırlığının birkaç katı su tutma özelliğinden dolayı kurak ortamda mikroorganizmaların uzun süre canlı kalmalarına katkı sunar. Nitekim bir araştırmada, bir *Pseudomonas* suşu ve ondan saflaştırılan EPS, kumlu bir toprağa eklendiğinde toprağın su tutma kapasitesini arttırdığı ve toprak nemini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Araştırmacılara göre EPS, koruyucu bir sünger gibi davranarak topraktaki bakterileri kurumaya karşı korumuş ve bakterilere metabolik aktivitelerini ayarlamalarını sağlayarak susuz ortamda canlılıklarını devam ettirmelerine olanak sağlamıştır (Roberson ve Firestone 1992).

3. Ekzopolisakkaritlerin Kimyasal Yapısı

Mikroorganizmalar tarafından dış ortama salgılanan veya hücre duvarına bağlı enzimler tarafından hücre dışı olarak sentezlenen polisakkaritlere genel olarak ekzopolisakkaritler denir. Mikrobiyal polisakkaritlerin yapısal özellikleri ve çeşitliliği, moleküler ağırlık, monosakkarit bileşimi ve konfigürasyonu, glikozidik bağların dizisi ve modeli, dal yapısı ve

zincir konformasyonu gibi birçok faktörle ilişkilidir (Nie ve Xie 2011). Mikroorganizma tipi, türü ve cinsine bağlı olarak sınırsız çeşitlilikte üretilen polisakkaritler, genel olarak EPS'yi oluşturan monosakkarit yapı birimlerine göre homopolisakkarit veya heteropolisakkarit olarak sınıflandırılırlar. Homopolisakkaritler sadece bir tür monosakkarit içerirken heteropolisakkaritler büyüklükleri disakkaritlerden heptasakkaritlere kadar değişen tekrarlayan birimlerden oluşur (Monsan vd. 2001; Mozzi vd. 2006). Homopolisakkaritler, glukanlar veya fruktanlar olarak da bilinir. Heteropolisakkaritlerin omurgası, dallanmış veya dallanmamış yapıda olabilen birkaç tekrar eden birimden oluşur ve çok karmaşık yapıya sahiptir. Heteropolisakkaritler, genellikle D-glukoz, D-galaktoz veya L-ramnoz gibi çeşitli oranlarda bazı şekerler, riboz ve fruktoz gibi bazı monosakkaritler, N-asetilglukozamin ve N-asetil galaktozamin gibi N-asetillenmiş monosakkaritlerin yanısıra glukuronik asit, fosfat, gliserol gibi inorganik maddeler de içerir. Suş tipi, ortam bileşimi, izolasyon kaynağı ve kültür şartlarının EPS'nin monosakkarit bileşimini etkilediği bilinir (Aslim vd. 2005). Bu polisakkaritlerdeki asetil, fosforil veya benzil grubu gibi değerli biyolojik aktif moleküllerin varlığı, mikrobiyal polisakkaritlerin antioksidan ve antitümör aktivitelerini önemli ölçüde arttırmaktadır (Liu vd. 2012; Abdel-Fattah vd. 2012). Ayrıca polisakkaritlerin omurgasında bulunan glukuronik asit ve sülfat kalıntılarının pıhtılaşma önleyici özelliklerinden dolayı EPS'ler biyomedikal öneme de sahiptir (Moore ve Tischer 1964; Cumashi vd. 2007; de Jesus Raposo vd. 2015). Bakterilerin sentezlediği ekzopolisakkaritlerde levan, asidik polisakkarit ve mannan da rapor edilmiştir (Maugeri vd. 2002). Bunların yanı sıra ekzopolisakkaritler, yapışma ve hücre agregasyonlarına katkı sağlayan ksantan ve N-asetilglukozamin gibi polianyonik ve polikasyonik bileşikler de içerir (Xiao ve Zheng 2016).

4. Mikrobiyal Ekzopolisakkaritlerin Anti-Kanser Etkileri

4.1. İnsan Kolon Kanseri ve Hepatik Karsinoma Hücre Hattı Üzerine EPS'nin Etkisi

Erkekler ve kadınlar arasında kansere bağlı ölümlerin önde gelen nedenlerinden biri olan kolorektal kanser, dünya çapında yılda yaklaşık 1,4 milyon yeni hastaya ve 0,5 milyondan fazla ölüme neden olmaktadır. Kolon kanserinin gelişmesinde, bazı proto-onkogenlerde ve tümör baskılayıcı genlerde oluşan mutasyon birikimi önemli rol oynar. Kolon kanseri hastaların sayısının her geçen gün artması ve bu kanser tipine bağlı ölüm oranının yüksek olması nedeniyle antitümör

etkili doğal ürün araştırmaları yoğun ilgi görmüştür. Kemoterapi, kanser tedavisi için en yaygın kullanılan terapötik yöntemlerden biri olmasına karşın şu anda kemoterapide kullanılan çoğu antikanser ilacı normal hücrelere sitotoksik etkilidir ve hemopoetik baskılama ve immünotoksisite gibi çoklu organ toksisitesine neden olur. Bu durum, kemoterapi tedavisinde kullanılan antitümör ajanlarının güçlü aktiviteye sahip olsalarda, güvenilirlikleri ve yan etkileri hakkında şüphelere yol açar. Bu bağlamda, kolon kanseri başta olmak üzere diğer kanser türleri üzerinde de eşsiz etkileri nedeniyle anti-tümör ajan olarak mikrobiyal EPS'lerin kullanılabilirliği ve sentetik anti-tümör ajanlara karşı alternatif olabileceği birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (Wollowski vd. 2001; Ehrke vd. 2003; Commane vd. 2005; Wong vd. 2007; Jemal vd. 2011; Górska-Frączek vd. 2013; Di vd. 2018). Örneğin, *Lactobacillus* suşlarından saflaştırılmış EPS'lerin HT-29 hücre hattı üzerinde anti-prolifera-tif, hücre apoptozu ve hücre döngüsü üzerindeki etkilerini araştıran Di vd. (2018), dört farklı *Lactobacillus* suşundan (*L. casei* M5, *L. casei* SB27, *L. casei* X12 ve *L. casei* K11) elde ettikleri ham ve asidik EPS'nin HT-29 hücre döngüsü faz dağılımı üzerindeki etkisini akış sitometrisi ile incelemiş ve bakteriyel EPS'nin kolon kanser hücre apoptozunu indüklediğini ifade etmiştir (Di vd. 2018). Bakteriyel EPS, hepatik karsinoma ve kolon kanser hücrelerinde bir veya daha fazla tümöre özgü reseptörü hedeflemektedir (Farak vd. 2020). Bu da, hücre küçülmesi veya çökmesi, membran disfonksiyonu, hücre granülasyonu veya agregasyonu ve çekirdek parçalanması ile hücre hasarı meydana getirmektedir (Chen vd. 2013). *Pseudomonas aeruginosa* A (CIP A22(PTCC1310)) ve B (klinik izolat) suşlarından elde edilen bakteriyel EPS ile yapılan bir çalışmaya göre, tümör büyümesi ve invazyonu, hücre döngüsü, apoptoz indüksiyonu ve metastaz inhibisyonu, EPS'nin kanser hücrelerine sitotoksik etkisiyle ilişkilidir (Tahmourespour vd. 2020) ve ayrıca bakteriyel polisakkaritler veya polisakkarit-protein kompleksleri, bağışıklığı güçlendirme mekanizmasında bağışıklık düzenleyici aktiviteye de sahiptir (Zhang vd. 2018). Çeşitli bağışıklık düzenleyici sitokinler ve sitokin reseptörleri gen ekspresyonunu indükleyebilir. Nitekim *Lactococcus lactis* NCR112 den saflaştırılan EPS'sinin HeLa ve HepG2 kanser hücrelerinin proliferasyonunu inhibe ettiği (Nguyen vd. 2014) ve bu polisakkaritlerin çeşitli gıdalara ilave edilerek kanser tedavilerinde yardımcı madde olarak kullanılabilirliği de bildirilmiştir (Nguyen vd. 2014; Farag vd. 2020)

4.2. İnsan Meme Kanseri ve Akciğer Kanseri Etkisi

Meme kanseri, özellikle kadınlarda yaygın olarak ortaya

çıkan bir malignitedir. Meme mikro ortamındaki bakterilerin meme kanseri hücreleriyle etkileşime girip girmediği ve bu etkileşimin kanser ilerlemesine nasıl etki ettiği hakkında çok az şey bilinmektedir. Günümüzde uygulanmakta olan kanser tedavilerinin ardından, tümör hücrelerinin çoğalmasına ek olarak, göğüs kanseri kök hücrelerinin hayatta kaldığı, bu kök benzeri hücrelerin tümörü yeniden oluşturduğu ve nükse yol açtığı düşünüldüğünden, meme kanseri tedavileri için önemli bir zorluk olarak ortaya çıkmaktadır. Komensal bakteri ve / veya bakteri ürünlerinin meme kanseri hücrelerinin büyümesini ve metastazını değiştirip değiştirmediğini ve nasıl değiştirdiğini açıklamaya çalışan araştırmalar mevcuttur (Nguyen vd. 2020). Çeşitli bakterilerin ürettiği ekzopolisakkaritler, antitümör etki sağlamaya uygundur; bunlar, tümör nekroz faktörü, interferon ve interlökin olarak sitokinlerin enflamatuvar aracılarını salgılayan makrofajların, T-lenfositlerin ve doğal öldürücü hücrelerin canlandırılmasını içerir. Ekzopolisakkaritler, tümör hücrelerinden hücreye yapışmasını kısıtlayan E-selektin proteini ve gen ekspresyonunu engelleyebilir. Diğer bir mekanizma ise; antiproliferatif etkilerini, hücre apoptozunu ve tümör hücrelerinin farklılaşmasını içerir. Bu mekanizmalar kullanılarak meme kanseri ve diğer birçok kanser hücrelerinin yok edilmesi mümkün olabilir (Mahgoub ve Gehan 2016). Nguyen vd.(2020) *Bacillus subtilis*'in (Ferdinand Cohn, 1872) ürettiği EPS'yi kullanarak yapmış olduğu araştırmalarda, EPS'nin meme kanseri proliferasyonu üzerindeki etkisini *in vitro* ortamda hormon reseptörü pozitif ve negatif hatlar dahil olmak üzere çeşitli meme kanseri hücre hatları üzerinde incelemiştir. Ulaşılan sonuçlar ise, EPS'nin birden çok meme kanseri hücre dizisinin (T47D, MDA-MB-468, MDA-MB-453, HCC1428) çoğalmasını konsantrasyona bağlı bir şekilde bastırıldığı ve diğer bazı hücre dizilerinin ise etkilenmediğini göstermiştir (BT549, MDA-MB-231, ZR -75-30, MCF7). Araştırmada ilk mammosfer sonuçlarına göre, EPS ile ön tedavinin T47D ve MCF7 hücrelerinde kanser kök hücre sağ kalımını artırdığını göstermektedir. Genel olarak, *Bacillus subtilis* EPS'sinin bazı göğüs kanseri hücre dizilerinin çoğalmasını doğrudan bastırırken, bazı kanser kök hücre dizilerinin hayatta kalmasını arttırmaktadır. Bu nedenle, *Bacillus subtilis*'in kanseri hücreleri üzerindeki etkileri, potansiyel olarak birçok farklı yöne sahiptir. Diğer bir deyişle, bakteriyel EPS sadece antikanser etki göstermemiş aynı zaman da kanser hücrelerinin çoğalmasını da indüklemiştir. Bu da EPS'nin kanser oluşum mekanizmaları üzerinde farklı etkilere yol açtığını düşündürmektedir (Liang vd. 2016; Nguyen vd. 2020).

Apoptoz, immüno modülasyonda ve hastalıkların savunulmasında çok önemli rol oynadığı için meme kanseri hücrelerinin yok edilmesinde önemli silahlardan biridir. Hücrelerin bu ölüm mekanizmaları, kanserli hücrelerin yok edilmesinde hedeflenen birincil mekanizmalardan biridir. Mahgoub vd. (2018)'de yaptığı araştırmada, meme kanseri hattı üzerinde mitokondri aracılı apoptozu gözlemlemiştir. Bu çalışmada deniz bakterisi olan *Bacillus velezensis* MHM3 suşunun ürettiği olduğu MHMEPS isimli EPS'nin MCF-7 hücre hattına karşı antikanser etkilerini değerlendirmiştir. Normal hücrelere sitotoksik etkisi olmayan *Bacillus velezensis* MHMEPS'nin MCF-7 kanser hücresine düşük konsantrasyonda yüksek antikanser potansiyeli dikkat çekicidir. MHMEPS'in mitokondriyal zarın geçirgenliğini artırarak mitokondri aracılı apoptozu aktive edebileceği de gösterilmiştir. Dahası, MHMEPS, sitokrom c'nin mitokondri-den sitozole salınmasını teşvik etmiş, mitokondri hasarını indükleyerek MCF-7 hücrelerinde apoptotik proteinleri kontrol etmiştir (Mahgoub vd. 2018).

İnsan kanser türlerinden biri olan akciğer kanseri A549 hücre hattı üzerine yapılan bazı çalışmalarda *Bacillus licheniformis* AG-06'dan saflaştırılan EPS kullanılmış ve A549 hücre hattı üzerine kimyasal ve fiziksel etkileri incelenmiştir. Saflaştırılan bu EPS, insan akciğer karsinom hücrelerine karşı önemli sitotoksik aktivite sergilemiş ve EPS'nin kansere karşı koruyucu bir potansiyele sahip olduğu rapor edilmiştir (Ramamoorthy vd. 2018; Vinothkanna vd. 2021).

4.3. İnsan Karaciğer ve Mide Kanseri Hücre Hattı Üzerinde EPS Etkisi

Mikrobiyal EPS'nin bir diğer kanser türü olan mide kanseri hücre hatları üzerine olan etkileri de ilgi çekici olup önemli araştırma konusudur. Mide kanserinin yıkıcı etkilerini azaltmak ve kanserli hücreleri bertaraf etmek için mikrobiyal EPS önemli bir anti-kanser potansiyele sahiptir. Özellikle endofitik bakterilerin ürettiği olduğu bileşenler kanserle savaşta önemli yer tutabilir. Endofitik bakteriler, doğal antikanser ürünlerin başlıca kaynaklarından biridir ve antrasiklinler, glikopeptitler, antrakininonlar, antimetabolitler, karzinofilin ve mitomisinler dahil olmak üzere geniş biyoaktif kanser karşıtı bileşiklerin üreticileri olarak bilinirler (Igarashi vd. 2007). Endofitler, konukçu bitkilerle aynı biyoaktif bileşikler üretebilen bakterilerdir. Bunlar, nadir ve önemli doğal ürünleri fermentasyon yoluyla sürekli üretebilirler ve dünyanın sürekli azalan bitkisel biyoçeşitliliğini koruyabileceği için dikkat çekici mikroorganizmalardır (Chiu vd. 2009;, Zhang vd. 2010;, Liu vd. 2012;, Chen vd. 2013; Li vd. 2016). Örneğin konukçu bir bitkiden izole edilen *Ba-*

cillus amyloliquefaciens sp. (MD-b1) bakterisi bir endofittir ve bu bakteriden saflaştırılan EPS, mide karsinoma hücre hatlarına (MC-4 ve SGC-7901) karşı antitümör etkiye sahiptir ve kanser hücrelerinde morfolojik anormalliklere de yol açmıştır. Ekzopolisakkaritin tedavi edilen hücrelerin mitokondriyal disfonksiyonu ile bağlantılı bir antitümör etki mekanizmasına sahip olduğu bildirilmiştir. Polisakkaritlerin mide tümör hücrelerine karşı apoptozu indükleyen etkisi, hücre apoptozu, hücre küçülmesi veya çökmesi, zar taşması, sınır bölünmesi veya kümelenmesi, çekirdek yoğunlaşması veya çekirdek parçalanması ile ortaya çıkabilir ve apoptozu indükleyen etki doza bağlıdır (Igarashi vd. 2007; Chen vd. 2011).

5. Gelecek

Mikrobiyal ekzopolisakkaritlerin antikanser etkilerindeki bu çeşitlilik sentezlenen polimerin zincir şekli, moleküler ağırlığı ve polimerin monosakkarit kompozisyonu yanı sıra polimer sentezinde mikroorganizma türü, kültür şartları, kullanılan karbon ve azot kaynakları gibi birçok faktörle de ilişkilidir. Eşsiz çeşitlilikte olan bu polimerler, antikanser etkilerini antimetastatik, antianjiyogenik, apoptotik ve otofaji sürece etki, hücre döngüsünün inhibisyonu ve antiproliferatif etki gibi farklı yollarla gösterebilir. Bu kadar farklı antikanser mekanizmalarının varlığı ve devasa polimer çeşitliliği dikkate alındığında, doğal ürünler üzerine yapılan tüm çalışmalar, kemoterapi ve radyoterapinin yan etkilerini azaltabilecek yeni kanser önleyici ilaçların veya gıda takviyelerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Özellikle mikrobiyal ekzopolisakkaritlerin karsinogenezi inhibe ettiği moleküler mekanizmaların daha detaylı olarak anlaşılmasına yönelik bilimsel çalışmalar bu tür doğal ürünlerin güvenilir bir şekilde kullanım potansiyelini güçlendirecektir.

Araştırmacı Katkı Oranı Beyanı: Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır. Potansiyel çıkar çatışması bulunmamaktadır.

6. Kaynaklar

- Abdel Fattah, AM., Gamal Eldeen, AM., Helmy, WA., Esawy, MA. 2012. Antitumor and antioxidant activities of levan and its derivative from the isolate *Bacillus subtilis* NRC1aza. *Carbohydrate Polymers*, 89(2): 314-322.
- Aslim, B., Yüksekdağ, ZN., Beyatlı, Y., Mercan, N. 2005. Exopolysaccharide production by *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* strains under different growth conditions. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 21(5): 673-677.

- Cerning, J. 1990. Exocellular polysaccharides produced by lactic acid bacteria. *FEMS Microbiol Rev.*, 7(1-2): 113-130. doi: 10.1111/j.1574-6968.1990.tb04883.x.
- Chenu, C. 1995. "Extracellular polysaccharides: an interface between microorganisms and soil constituents," In: Huang, P.M., Berthelin, J., Bollag, J.M., McGill, W.B., Page, A.L., editors. *Environmental Impact of Soil Component Interactions. Natural and Anthropogenic Organics*. Boca Raton, FL: CRC Lewis Publishers, 1995. pp.75-85.
- Chen, YT., Lu, QY., Lin, MA., Cheng, DQ., Ding, ZS., Shan, LT. 2011. A PVP-extract fungal protein of *Omphalia lapideaceus* and its antitumor activity on human gastric tumors and normal cells. *Oncol Rep.*, 26(6): 1519-1526.
- Chen, YT., Yuan, Q., Shan, LT., Lin, MA., Cheng, DQ., Li, CY. 2013. Antitumor activity of bacterial exopolysaccharides from the endophyte *Bacillus amyloliquefaciens* sp. isolated from *Ophiopogon japonicus*. *Oncol Lett.*, 5(6): 1787-1792.
- Chiu, TH., Lai, WW., Hsia, TC., Yang, JS., Lai, TY., Wu, PP., Ma, CY., Yeh, CC., Ho, CC., Lu, HF., Wood, WG., Chung, JG. 2009. Aloe-emodin induces cell death through S-phase arrest and caspase-dependent pathways in human tongue squamous cancer SCC-4 cells. *Anticancer Res.*, 29: 4503-4511.
- Commane, D., Hughes, R., Shortt, C., Rowland, I. 2005. The potential mechanisms involved in the anti-carcinogenic action of probiotics. *Mutat Res.*, 591(1-2): 276-289.
- Costa, OYA., Raaijmakers, JM., Kuramae, EE. 2018. Microbial Extracellular Polymeric Substances: Ecological Function and Impact on Soil Aggregation. *Front. Microbiol.*, 9:1636.
- Cumashi, A., Ushakova, NA., Preobrazhenskaya, ME., D'Incecco, A., Piccoli, A., Totani, L., Tinari, N., Morozevich, GE., Berman, AE., Bilan, MI., Usov, AI., Ustyuzhanina, NE., Grachev, AA., Sanderson, CJ., Kelly, M., Rabinovich, GA., Iacobelli, S., Nifantiev, NE. 2007. Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Bio-Oncologia, Italy. A comparative study of the anti-inflammatory, anticoagulant, antiangiogenic, and antiadhesive activities of nine different fucoidans from brown seaweeds. *Glycobiology*. 17(5): 541-552.
- Currier, WW., Strobel, GA. 1976. Chemotaxis of *Rhizobium* spp to plant root exudates. *Plant Physiol.* 57: 820-823.
- Di, W., Zhang, L., Yi, H., Han, X., Zhang, Y., Xin, L. 2018. Exopolysaccharides produced by *Lactobacillus* strains suppress HT-29 cell growth via induction of G0/G1 cell cycle arrest and apoptosis. *Oncol. Lett.*, 16(3): 3577-3586. doi: 10.3892/ol.2018.9129.
- Ehrke, MJ. 2003. Immunomodulation in cancer therapeutics. *Int. Immunopharmacol.* 3(8): 1105-1119. DOI: 10.1016/S1567-5769(03)00021-3

- Erejuwa, OO., Sulaiman, SA., Wahab, MS. 2014.** Effects of honey and its mechanisms of action on the development and progression of cancer. *Molecules*, 19(2): 2497-2522.
- Farag, MMS., Moghannem, SAM., Shehabeldine, AM., Azab, MS. 2020.** Antitumor effect of exopolysaccharide produced by *Bacillus mycoides*. *Microb. Pathog.*, 140:103947.
- Flemming, HC., Wingender, J. 2010.** The biofilm matrix. *Nat Rev Microbiol.*, 8(9): 623-633.
- Górska-Frączek, S., Sandström, C., Kenne, L., Paściak, M., Brzozowska, E., Strus, M., Heczko, P., Gamian, A. 2013.** The structure and immunoreactivity of exopolysaccharide isolated from *Lactobacillus johnsonii* strain 151. *Carbohydr. Res.*, 378: 148-153.
- Houari, A., Picard, J., Habarou, H., Galas, L., Vaudry, H., Heim, V., Di Martino, P. 2008.** Rheology of biofilms formed at the surface of NF membranes in a drinking water production unit. *Biofouling*, 24(4): 235-240.
- Igarashi, Y., Trujillo, ME., Martínez-Molina, E., Yanase, S., Miyanaga, S., Obata, T. Sakurai, H., Saiki, I., Fujita, T., Furumai, T. 2007.** Antitumor anthraquinones from an endophytic actinomycete *Micromonospora lupini* sp. nov. *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, 17(13): 3702-3705.
- Jemal, A., Bray, F., Center, MM., Ferlay, J., Ward, E., Forman, D. 2011.** Global cancer statistics. *CA Cancer J. Clin.*, 61(2): 69-90.
- Jesus Raposo, MF., de Morais, AM., de Morais, RM. 2015.** Marine polysaccharides from algae with potential biomedical applications. *Mar. Drugs*, 13(5): 2967-3028.
- Király, Z., El-Zahaby, HM., Klement, Z. 1997.** Role of extracellular polysaccharide (EPS) slime of plant pathogenic bacteria in protecting cells to reactive oxygen species. *J. Phytopathol.*, 145(2-3): 59-68.
- Lehman, AP., Long, SR. 2013.** Exopolysaccharides from *Sinorhizobium meliloti* can protect against H₂O₂-dependent damage. *J. Bacteriol.*, 195(23): 5362-5369.
- Liang, TW., Tseng, SC., Wang, SL. 2016.** Production and Characterization of Antioxidant Properties of Exopolysaccharide(s) from *Paenibacillus mucilaginosus* TKU032. *Mar. Drugs*, 14(2): 40.
- Liu, J., Luo, J., Ye, H., Zeng, X. 2012.** Preparation, antioxidant and antitumor activities in vitro of different derivatives of levan from endophytic bacterium *Paenibacillus polymyxa* EJS-3. *Food Chem. Toxicol.*, 50(3-4): 767-772.
- Li, Y., Guo, S., Zhu, H. 2016.** Statistical optimization of culture medium for production of exopolysaccharide from endophytic fungus *Bionectria ochroleuca* and its antitumor effect in vitro. *EXCLI J.*, 15: 211-220.
- Mahgoub, AM., Gehan, AE. 2016.** Quince polysaccharides induced apoptosis in human colon cancer cells (HCT-116). *Res. In. Can. Tumor*, 5: 1-9.
- Mahgoub, AM., Mahmoud, MG., Selim, MS., El Awady, ME. 2018.** Exopolysaccharide from Marine *Bacillus velezensis* MHM3 Induces Apoptosis of Human Breast Cancer MCF-7 Cells through a Mitochondrial Pathway. *Asian Pac. J. Cancer Prev.*, 19(7): 1957-1963.
- Manca de Nadra, MC., Strasser de Saad, AM., Pesce de Ruiz Holgado, AA., Oliver, G. 1985.** Extracellular polysaccharide production by *Lactobacillus bulgaricus* CRL 420. *Milchwissenschaft*. 40:409-411.
- Maugeri, TL., Gugliandolo, C., Caccamo, D., Panico, A., Lama, L., Gambacorta, A., Nicolaus, B. 2002.** A halophilic thermotolerant *Bacillus* isolated from a marine hot spring able to produce a new exopolysaccharide. *Biotechnol. Lett.*, 24: 515-519.
- Monsan, P., Bozonnet, S., Albenne, C., Joucla, G., Willemot, RM., Remaud-Siméon, M. 2001.** Homopolysaccharides from lactic acid bacteria, *Int. Dairy J.*, 11(9): 675-685.
- Moore, BG., Tischer, RG. 1964.** Extracellular polysaccharides of algae: effects on life-support systems. *Science*. 145(3632): 586-587.
- Mozzi, F., Oliver, G., Savoy de Giori, G., Font de Valdez, FG. 1995.** Influence of temperature on the production of exopoly saccharides by thermophilic lactic acid bacteria. *Milchwissenschaft*. 50: 80-82.
- Mozzi, F., Vaningelgem, F., Hébert, EM., Van der Meulen, R., Foulquié Moreno, MR., Font de Valdez, G., De Vuyst, L. 2006.** Diversity of heteropolysaccharide-producing lactic acid bacterium strains and their biopolymers. *Appl. Environ. Microbiol.*, 72(6): 4431-4435.
- Nguyen, DT., Nguyen, TH. 2014.** Detection on Antioxidant and Cytotoxicity Activities of Exopolysaccharides Isolated in Plant-Originated *Lactococcus lactis*. *Biomed. Pharmacol. J.*, 7(1): 33-38.
- Nguyen, MR., Osipo, C., Knight, KL. 2020.** Abstract 6101: Exopolysaccharide secreted by *Bacillus subtilis* alters breast cancer cell growth and stemness. *Cancer Res.*, 80(16_Supplement): 6101.
- Nie, SP., Xie, MY. 2011.** A review on the isolation and structure of tea polysaccharides and their bioactivities. *Food Hydrocolloids*. 25(2): 144-149.
- Payne, DE., Boles, BR. 2016.** Emerging interactions between matrix components during biofilm development. *Curr. Genet.*, 62(1): 137-41.

- Ramamoorthy, S., Gnanakan, A., Lakshmana, S., Meivelu, M., Jeganathan, A. 2018.** Structural characterization and anticancer activity of extracellular polysaccharides from ascidian symbiotic bacterium *Bacillus thuringiensis*. *Carbohydr. Polym.*, 190: 113-120.
- Roberson, EB., Firestone, MK. 1992.** Relationship between Desiccation and Exopolysaccharide Production in a Soil *Pseudomonas* sp. *Appl. Environ. Microbiol.*, 58(4): 1284-1291.
- Roca, C., Alves, VD., Freitas, F., Reis, MA. 2015.** Exopolysaccharides enriched in rare sugars: bacterial sources, production, and applications. *Front. Microbiol.*, 6: 288.
- Shaw, T., Winston, M., Rupp, CJ., Klapper, I., Stoodley, P. 2004.** Commonality of elastic relaxation times in biofilms. *Phys. Rev. Lett.*, 93(9): 098102.
- Solmaz, KB., Ozcan, Y., Mercan Dogan, N., Bozkaya, O., Ide, S. 2018.** Characterization and Production of Extracellular Polysaccharides (EPS) by *Bacillus Pseudomycooides* U10. *Environments*. 5(6): 63.
- Tahmourespour, A., Ahmadi, A., Fesharaki, M. 2020.** The anti-tumor activity of exopolysaccharides from *Pseudomonas* strains against HT-29 colorectal cancer cell line. *Int. J. Biol. Macromol.*, 149: 1072-1076.
- Tuinier, R., Zoon, P., Olieman, C., Stuart, MA., Fleer, GJ., de Kruif, CG. 1999.** Isolation and physical characterization of an exocellular polysaccharide. *Biopolymers*. 49(1): 1-9.
- Vinothkanna, A., Sathiyarayanan, G., Balaji, P., Mathivanan, K., Pugazhendhi, A., Ma, Y., Sekar, S., Thirumurugan, R. 2021.** Structural characterization, functional and biological activities of an exopolysaccharide produced by probiotic *Bacillus licheniformis* AG-06 from Indian polyherbal fermented traditional medicine. *Int. J. Biol. Macromol.*, 174: 144-152.
- Wollowski, I., Rechkemmer, G., Pool-Zobel, BL. 2001.** Protective role of probiotics and prebiotics in colon cancer. *Am. J. Clin. Nutr.*, 73(2 Suppl):451S-455S.
- Wong, YN., Chang, WC., Clapper, M. Engstrom, PF. 2007.** Chemoprevention of colorectal cancer. In: Saltz LB, Markman M, editors. *Colorectal Cancer: Evidence-Based Chemotherapy Strategies*. Humana Press. Inc.; Totowa NJ, pp. 33-49.
- Xiao, R., Zheng, Y. 2016.** Overview of microalgal extracellular polymeric substances (EPS) and their applications. *Biotechnol. Adv.*, 34(7): 1225-1244.
- Zhang, JY., Tao, LY., Liang, YJ., Chen, LM., Mi, YJ., Zheng, LS., Wang, F., She, ZG., Lin, YC., To, KK., Fu, LW. 2010.** Anthracenedione derivatives as anticancer agents isolated from secondary metabolites of the mangrove endophytic fungi. *Mar. Drugs.*, 8(4): 1469-1481.
- Zhang, M., Tian, X., Wang, Y., Wang, D., Li, W., Chen, L., Pan, W., Mehmood, S., Chen, Y. 2018.** Immunomodulating activity of the polysaccharide TLH-3 from *Tricholomalobayense* in RAW264.7 macrophages. *Int. J. Biol. Macromol.*, 107(Pt B): 2679-2685.

Makalenin Adı:

Yazarların adı (makaledeki sırayla):

Biz aşağıda imzaları bulunan yazarlar, sunduğumuz makalenin orijinal olduğunu; başka bir dergiye yayınlanmak üzere verilmediğini, daha önce yayınlanmadığını, eğer, tümüyle ya da bir bölümü yayınlandı ise yukarıda adı geçen dergide yayınlanabilmesi için gerekli her türlü iznin alındığını ve orijinal telif hakkı devri formu ile birlikte *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi Editörlüğü*'ne gönderildiğini garanti ederiz.

Makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederek sorumluluğu üstlenir ve imza ederiz.

Bu vesileyle makalenin telif hakkı Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'ne devredilmiştir.

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi Editörlüğü makalenin yayınlanabilmesi konusunda yetkili kılınmıştır. Bununla birlikte yazarların aşağıdaki hakları saklıdır:

1. Telif Hakkı dışında kalan patent vb. bütün tescil edilmiş haklar.
2. Yazarın gelecekteki kitaplar ve dersler gibi çalışmalarında; makalenin tümü ya da bir bölümünü ücret ödemeksizin kullanma hakkı.
3. Makaleyi satmamak koşulu ile kendi amaçları için çoğaltma hakkı.

Bütün yazarlar tarafından imzalanmak üzere:

Yazar Adı : (Yazarlar sırayla yazılacaktır)	Tarih : .../.../.....	İmza :
Yazar Adı :	Tarih : .../.../.....	İmza:
Yazar Adı :	Tarih : .../.../.....	İmza:
Yazar Adı :	Tarih : .../.../.....	İmza:
Yazar Adı :	Tarih : .../.../.....	İmza:
Yazar Adı :	Tarih : .../.../.....	İmza:

Makaleyi gönderen sorumlu yazarın;

Adı-Soyadı:

Yazışma Adresi : **(Sorumlu yazara ait posta gönderim adresi)**

Telefonu : **(Sorumlu yazara ulaşılabilecek telefon numarası)**

Belge Geçer : **(Sorumlu yazara ulaşılabilecek faks numarası)**

E-posta : **(Sorumlu yazarın e-mail adresi)**

Manuscript Title:**Full names of all authors (in order to appear on manuscript)**

The undersigned authors, we guarantee that our submitted manuscript is original work; it has not been published and is not being submitted or considered for publication elsewhere, if, in whole or part of the publication of the magazine was published for the above-mentioned receipt of all necessary permits and was sent to *Editorial Office of Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi* with copyright transfer form.

We agree to waive the right to assume the responsibility of the copyright of the article and thank signature.

This article is hereby transferred to the copyright of Zonguldak Bülent Ecevit University.
Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi Editor of the publication of the article is authorized.
However, the authors reserve the following rights:

1. All proprietary rights Copyright outside, such as patent.
2. to use, free of charge, all parts of this article for the author's future works in books, lectures.
3. the right to reproduce the article for their own purposes provided the copies are not offered for sale.

To be signed by all authors:

Author Name : (The authors will be written in the order)	Date : .../.../.....	Signature :
Author Name :	Date : .../.../.....	Signature :
Author Name :	Date : .../.../.....	Signature :
Author Name :	Date : .../.../.....	Signature :
Author Name :	Date : .../.../.....	Signature :
Author Name :	Date : .../.../.....	Signature :

Corresponding author's

Name-Surname:

Address : **(Corresponding author's mail address)**

Phone : **(Corresponding author's contact phone number)**

Fax : **(Corresponding author's contact fax number)**

E-mail : **(Corresponding author's e-mail address)**